

SOMMAIRE

Résumé

Abstract

Remerciements

Liste des figures.....12

Liste des tableaux.....17

INTRODUCTION GENERALE.....19

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART SUR LE MATERIAU BETON.....21

1.1 Introduction.....22

1.2 Historicité.....23

1.3 Les composants d'un béton.....23

1.3.1 Pâte de ciment.....24

1.3.1.1 Ciment.....24

1.3.1.2 L'eau de gâchage.....25

1.3.1.3 Les additions minérales.....25

1.3.1.4 Les adjuvants.....25

1.3.2 Les granulats.....26

1.4 Malaxage des constituants.....27

1.5 Propriétés essentielles d'un béton.....29

1.5.1 A l'état frais.....29

1.5.2 A l'état durci.....30

1.6 Essais de caractérisation des bétons.....31

1.6.1 A l'état frais.....31

1.6.1.1 Essai d'affaissement au cône d'Abrams [NF P 18-451]31

1.6.2 A l'état durci.....	32
1.6.2.1 Essai de résistance à la compression.....	32
1.6.2.2 Essai de résistance en ultrason.....	33
1.7 Paramètres qui influent sur les caractéristiques du béton.....	33
1.7.1 Influence du rapport eau/ciment (E/C).....	33
1.7.2 Influence du dosage en ciment.....	37
1.7.3 Influence du type de ciment.....	38
1.7.4 Influence du rapport granulat/ciment (G/C).....	39
1.7.5 Influence du squelette granulaire.....	41
1.7.6 Influence de la taille maximale des granulats (D_{max}).....	42
1.7.7 Influence du squelette granulaire sur l'affaissement.....	43
1.7.8 Influence des adjuvants.....	44
1.8 Conclusion.....	45

CHAPITRE 2 : METHODES DE FORMULATION DES BETONS.....46

2.1 Méthodes de formulation des bétons.....	47
2.1.1 Introduction.....	47
2.1.2 Méthodes de formulations.....	47
2.1.2.1 Méthode de Bolomey.....	47
2.1.2.2 Méthode de Caquot.....	48
2.1.2.3 Méthode de Valette.....	48
2.1.2.4 Méthode de Faury.....	48
2.1.2.5 Méthode de Joisel.....	49
2.1.2.6 Méthode de Dreux Gorisse.....	50
2.1.2.7 Méthode de Baron Lesage.....	51
2.1.2.8 Méthode des volumes absolus.....	53
2.1.2.9 Méthode Britannique.....	54
2.1.2.10 Méthode Américaine ACI 211.....	55

2.1.2.11	Méthode des plans d'expériences	57
2.1.2.12	Méthode de Taguchi.....	63
2.2	Conclusion.....	65
CHAPITRE 3	: CARACTERISATION DES MATERIAUX.....	66
3.1	Introduction	67
3.2	Caractéristiques physico-chimiques du ciment.....	67
3.2.1	Composition chimique et minéralogique.....	67
3.2.2	Caractéristiques physico- mécaniques.....	68
3.2.2.1	Masses volumiques (apparente et absolue)	68
3.2.2.2	Essai de consistance.....	68
3.2.2.3	Essai de prise	68
3.2.3	Interprétation des résultats.....	69
3.2.4	Agrégats (sable et graviers)	69
3.2.4.1	Analyse granulométrique.....	70
3.2.4.2	Propreté des granulats.....	77
3.2.5	Masses volumiques apparentes et absolues.....	78
3.2.6	Foisonnement du sable.....	79
3.3	Caractérisation des bétons étudiés.....	80
3.3.1	Caractérisation du béton à l'état frais.....	80
3.3.1.1	l'affaissement.....	81
3.3.2	Confection des éprouvettes.....	81
3.3.2.1	Remplissage des moules.....	81
3.3.2.2	Mise en place du béton.....	81
3.3.2.3	Conservation des éprouvettes.....	82

3.3.3 Caractérisation du béton à l'état durci.....	83
3.3.3.1 Essai de résistance à la compression	83
3.3.3.2 Essai de résistance en ultrason	83
3.4 Conclusion.....	84

CHAPITRE 4: APPROCHE PROCESSUS APPLIQUE A LA METHODE TAGUCHI.....85

4.1 Introduction.....	86
4.2 Définition d'un processus.....	86
4.3 Construction des processus de formulation du béton à l'état frais.....	87
4.4 Processus d'application des essais de compression sur le béton à l'état durci à 14 jours.....	91
4.5 Processus d'application des essais d'ultrason sur le béton à l'état durci à 14 jours.....	96
4.6 Conclusion.....	100

CHAPITRE 5 : RESULTATS ET DISCUSSIONS101

5.1 Mise en application de la méthode Taguchi.....	102
5.1.1 Facteurs.....	102
5.1.2 Niveaux des facteurs.....	102
5.1.3 Choix de la matrice de Taguchi pour notre étude.....	102
5.2 Formulation des bétons étudiés.....	105
5.3 Affaissement.....	106

5.3.1 Détermination des coefficients du modèle.....	107
5.3.2 Interprétation.....	108
5.4 Résistance mécanique en compression.....	110
5.4.1 Détermination des coefficients du modèle.....	111
5.4.2 Interprétation.....	112
5.5 Ultrason.....	114
5.5.1 Détermination des coefficients du modèle.....	115
5.5.2 Interprétation.....	115
5.6 Conclusion.....	117
CONCLUSION GENERALE.....	119
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	120

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Pourcentage des constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [DEGHFEL MOUSSA, 2010].....	24
Figure 1.2 : L'utilisation des superplastifiants [DREUX G., FIESTA J., 1998].....	26
Figure 1.3 : Cycle de malaxage [NGOC-DONG, 2007].....	28
Figure 1.4 : Accroissement de la densité du béton au cours de malaxage[CAZACLIU ET COL, 2006].....	28
Figure 1.5 : Essai d'affaissement au cone d'Abrams	31
Figure 1.6 : Machine d'essai de compression.....	32
Figure 1.7 : corrélation résistance à la compression –vitesse ultrasonique.....	33
Figure 1.8 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport E/C [S.M.A Boukli Hacene, 2010].....	34
Figure 1.9 : Relation entre la résistance à la compression et le rapport C/E [Neville, 2000].....	35
Figure 1.10 : Relation entre la résistance calculée d'une pâte pure de ciment et le rapport ciment/eau [Nielsen, 1993].....	35
Figure 1.11 : Relation entre le rapport C/E et la résistance à la compression f_c d'après la formule de Bolomey [G.Dreux et J.Festa, 1998].....	36
Figure 1.12 : Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton [Baron et Ollivier, 1996].....	37
Figure 1.13 : Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme [Baron et Ollivier, 1996].....	39
Figure 1.14 : Influence du rapport G/C sur la résistance du béton [Neville, 2000].....	40

Figure 1.15 : Relation entre la résistance à la compression de cylindres de béton (10×30cm) et le volume de granulats pour un rapport E/C constant de 0.5 [Stock et Col, 1979].....	41
Figure 1.16 : Variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction du rapport G/S [G.Dreux et J.Festa, 1998].....	42
Figure 1.17 : Influence de la dimension maximale des granulats sur la résistance à la compression à 28 jours pour des bétons ayant différents dosage en ciment [Neville, 2000].....	43
Figure 1.18 : Optimisation du rapport G/S en fonction de l'affaissement [S.M.A. Boukli Hacene, 2010].....	44
Figure 1.19 : Effet du dosage en superplastifiant sur l'affaissement [Adjoudj et col, 2009].....	44
Figure 1.20 : Variation de la résistance à la compression d'un béton adjuvanté par SP1 et SP2 [Adjoudj et col, 2009].....	45
Figure 2.1 : courbe granulatoire de référence selon Dreux [Dreux 1970].....	50
Figure 2.2 : effet du rapport gravillon/sable (G/S) sur les propriétés du béton frais [De Larrard, 2000].....	53
Figure 2.3 : méthode traditionnelle d'expérimentation et courbe de réponse [Pillet, 1992].....	57
Figure 2.4 : Maillage du domaine expérimental et surface de réponse [Pillet, 1992].....	58
Figure 2.5 : Domaine expérimental d'un plan factoriel complet 2^3 [Sado et Sado, 1991].....	60
Figure 2.6 : Triangle de Féret, 1892 [Baron et Ollivier, 1996].....	60
Figure 2.7 : Points expérimentaux pour un plan de mélange à trois constituants [Baron et Ollivier, 1996].....	61
Figure 2.8 : Organigramme général de traitement des plans d'expériences [S.M.A. Boukli Hacene, 2010].....	62
Figure 3.1 : Tamiseuse électrique.....	70
Figure 3.2 : Courbe granulométrique des granulats (ENG).....	77
Figure 3.3 : Courbe de foisonnement du sable (carrière ENG)	79

Figure 3.4: Mesure de l'affaissement du béton au cône d'Abrams (Affaissement égal à 3,5 cm).....	81
Figure 3.5 : Conservation des éprouvettes.....	82
Figure 3.6 : Machine d'essai de compression.....	84
Figure 4.1 : processus de formulation 1 du béton ordinaire.....	87
Figure 4.2 : processus de formulation 2 du béton ordinaire.....	87
Figure 4.3 : processus de formulation 3 du béton ordinaire.....	88
Figure 4.4 : processus de formulation 4 du béton ordinaire.....	88
Figure 4.5 : processus de formulation 5 du béton ordinaire.....	89
Figure 4.6 : processus de formulation 6 du béton ordinaire.....	89
Figure 4.7 : processus de formulation 7 du béton ordinaire.....	90
Figure 4.8 : processus de formulation 8 du béton ordinaire.....	90
Figure 4.9 : processus de formulation 9 du béton ordinaire.....	91
Figure 4.10 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la première formulation à l'état durci à 14 jours.....	91
Figure 4.11 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la deuxième formulation à l'état durci à 14 jours.....	92
Figure 4.12 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la troisième formulation à l'état durci à 14 jours.....	92
Figure 4.13 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la quatrième formulation à l'état durci à 14 jours.....	93
Figure 4.14 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la cinquième formulation à l'état durci à 14 jours.....	93
Figure 4.15 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la sixième formulation à l'état durci à 14 jours.....	94

Figure 4.16 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la septième formulation à l'état durci à 14 jours.....	94
Figure 4.17 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la huitième formulation à l'état durci à 14 jours.....	95
Figure 4.18 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la neuvième formulation à l'état durci à 14 jours.....	95
Figure 4.19 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la première formulation à l'état durci à 14 jours.....	96
Figure 4.20 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la deuxième formulation à l'état durci à 14 jours.....	96
Figure 4.21 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la troisième formulation à l'état durci à 14 jours.....	97
Figure 4.22 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la quatrième formulation à l'état durci à 14 jours.....	97
Figure 4.23 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la cinquième formulation à l'état durci à 14 jours.....	98
Figure 4.24 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la sixième formulation à l'état durci à 14 jours.....	98
Figure 4.25 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la septième formulation à l'état durci à 14 jours.....	99
Figure 4.26 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la huitième formulation à l'état durci à 14 jours.....	99
Figure 4.27 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la neuvième formulation à l'état durci à 14 jours.....	100
Figure 5.1 : Réponse de l'affaissement en fonction du ciment et du rapport E/C.....	109
Figure 5.2 : Réponse de l'affaissement en fonction du ciment et du rapport G/S.....	109
Figure 5.3 : Réponse de l'affaissement en fonction du rapport E/C et G/S.....	110

Figure 5.4 : Réponse de la résistance en compression en fonction du ciment et du rapport E/C.....112

Figure 5.5 : Réponse de la résistance en compression en fonction du ciment et du rapport G/S.....113

Figure 5.6 : Réponse de la résistance en compression en fonction du rapport E/C et G/S.....113

Figure 5.7 : Réponse de la résistance en ultrason en fonction du ciment et du rapport E/C.....116

Figure 5.8 : Réponse de la résistance en ultrason en fonction du ciment et du rapport G/S.....116

Figure 5.9 : Réponse de la résistance en ultrason en fonction du rapport E/C et G/S.....117

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Classe de consistance (affaissement) [DUPAIN R ET AL. 2000].....	31
Tableau 1.2 : Dosage en ciment [BAEL 91].....	38
Tableau 2.1 : paramètres pris en compte dans la détermination de Y.....	51
Tableau 2.2 : Dosage approximatif en eau de gâchage et teneur en air pour différents affaissements et dimension maximale nominale du gros granulat selon la norme ACI 211.1-91	55
Tableau 2.3 : Résistances à la compression approximatives de bétons confectionnés avec un rapport E/C de 0,5 suivant la méthode Britannique de 1988 [Neville, 2000].....	56
Tableau 2.4 : Volume en vrac de gros granulat par unité de volume de béton selon la norme ACI 211.1-91	56
Tableau 3.1 : Composition chimique du ciment	67
Tableau 3.2 : Composition de Bogue minéralogique du ciment.....	67
Tableau 3.3 : Caractéristiques physico- mécaniques du ciment.....	69
Tableau 3.4 : Analyse granulométrique du sable.....	71
Tableau 3.5 : Spécification techniques pour les sables.....	72
Tableau 3.6 : Teneur en fines de la fraction 0/4 mm.....	73
Tableau 3.7 : Analyse granulométrique du gravier 4/8.....	74
Tableau 3.8 : Analyse granulométrique du gravier 8/16.....	75
Tableau 3.9 : Analyse granulométrique du gravier 16/25.....	76
Tableau 3.10 :L'équivalent de sable pour deux éprouvettes.....	78
Tableau 3.11 : Identification des propriétés des granulats de l'ENG.....	80
Tableau 5.1 : niveaux des facteurs.....	102
Tableau 5.2 : matrice des effets.....	105

Tableau 5.3 : formulation des bétons constitués.....	106
Tableau 5.4 : résultats des essais d'affaissement.....	107
Tableau 5.5 : Résultats des essais de résistance.....	111
Tableau 5.6 : Résultats des essais d'ultrason.....	115

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Ces performances ne cessent de s'améliorer grâce à la recherche scientifique.

Plusieurs méthodes de formulations ont été développées à travers le temps dont certaines se basent sur les caractéristiques des constituants, d'autres sur des analyses statistiques. La méthode Taguchi qui se base sur la démarche qualité peut être intéressante dans le sens où elle permet de faire réduire le nombre de mélanges testés tout en variant plusieurs paramètres (facteurs) à la fois. Cette démarche permet à la fois d'évaluer les effets des constituants et leurs interactions et de développer des modèles prédictifs qui peuvent être facilement exploités dans le secteur socioprofessionnel.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des paramètres clés sur les propriétés essentielles d'un béton ordinaire, à savoir l'ouvrabilité et sa résistance mécanique en termes de qualité.

La qualité définie par la norme ISO 9001 comme étant une aptitude d'un ensemble des caractéristiques intrinsèques à satisfaire des exigences.

Dans l'ingénierie système, la norme ISO/IEC 15288 classe le processus de management de la qualité comme un des processus cohabitant avec les processus de projet, les processus contractuels et les processus techniques. L'objectif de ce processus dans l'ingénierie est donc d'assurer que les produits, services satisfont à la fois l'objectif qualité et du client.

Pour répondre à cet objectif, une série de formulations a été étudiée en utilisant la démarche de Taguchi. Ce mémoire est structuré en six chapitres :

Après une introduction générale, le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur le matériau béton, il présente aussi les détails relatifs sur les constituants du béton.

Le deuxième chapitre est destiné sur les rappels des méthodes de formulation des bétons.

La caractérisation des différents matériaux utilisés est présentée dans le troisième chapitre. Dans le quatrième chapitre, nous élaborons des processus qui résument l'étude de l'approche processus appliqué à la méthode Taguchi.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons l'étude expérimentale visant à déterminer les relations existantes entre les différents paramètres caractérisant le comportement des bétons.

Enfin, une conclusion générale clôturera ce mémoire.

CHAPITRE 1

ETAT DE L'ART SUR LE MATERIAU BETON

1.1 Introduction :

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde. Déjà à l'époque Romaine, il y a presque 2000 ans, il fut utilisé dans la construction du dôme du Panthéon. Des siècles plus tard, le béton s'est modernisé grâce à une recherche active donnant jours à des matériaux durables, économiques, beaux et respectueux à l'environnement. A nos jours, ce matériau continue à séduire et à réussir sans cesse à relever les défis de la construction.

La qualité et le potentiel du matériau béton dans la structure dépend des matériaux de base qui entrent dans sa formulation mais également des opérations de malaxage, mise en œuvre, vibration et cure.

Le béton ordinaire est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite constitué d'un mélange de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Le liant peut être « hydraulique », car il fait prise par hydratation, il est appelé ciment, on obtient dans ce cas un béton de ciment, ou béton tout court. Le liant peut être aussi un hydrocarboné appelé aussi bitume, ce qui conduit à la fabrication du béton bitumineux.

Le béton classique est constitué d'éléments de granulométrie différente. Le spectre granulométrique se poursuit également avec la poudre de ciment et parfois avec un matériau de granulométrie encore plus fine comme la fumée de silice. La continuité du spectre granulométrique peut être étendue vers les faibles granulométries de manière à améliorer la compacité, donc les performances mécaniques du béton [**Béton -définition, 2008**].

L'eau joue un double rôle : hydratation de la poudre de ciment et amélioration de l'ouvrabilité. En absence d'adjuvant de type super plastifiant, la quantité d'eau est déterminée par les conditions de mise en œuvre. Un béton contient donc une part importante d'eau libre, ce qui tend à favoriser une forte porosité et donc une faible résistance du béton durci. En ajoutant un super plastifiant, appelé aussi haut réducteur d'eau, la quantité d'eau utilisée décroît et les performances rhéologique ou mécaniques du matériau sont améliorées comme c'est le cas des bétons autoplaçants ou les bétons de hautes performances (BHP).

Et pour cela nous allons parler dans ce chapitre sur les composants d'un béton ainsi que les paramètres qui influencent sur ce béton.

1.2 historicité :

L'histoire du béton montre que sa technique, bien fixée empiriquement par les romains, avec la chaux grasse et la pouzzolane, a évolué seulement au 19^{ème} siècle, après l'apparition des chaux hydrauliques et des ciments.

L'invention de la chaux hydraulique par Louis Vicat en **1817**, celle du ciment portland par Aspdin en Ecosse en **1824** et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en France en **1830** préparent l'avènement du béton [**Cimbéton, 2006**].

A l'origine, le béton était constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la plupart des cas, le ciment était du ciment portland obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis le broyé. Par la suite, des petites quantités d'adjuvants chimiques ont été ajoutées au mélange afin d'améliorer certaines des propriétés du béton à l'état frais ou durci.

Au **20^{ème}** siècle, le béton se développa considérablement avec l'apparition de nouveaux matériaux tels que les adjuvants, ou par l'innovation du matériel de mise en œuvre, donnant naissance à de nouvelles familles de bétons tels que les bétons de haute performance qui sont caractérisés par des résistances allant jusqu'à 200 MPa et à une excellente durabilité ou encore les bétons autoplaçants qui se mettent en place sans moyens de vibration.

1.3 les composants d'un béton :

Le béton est un mélange homogène constitué de plusieurs composants hétérogènes : le ciment, le sable, le gravier, l'eau et dans certains cas l'adjuvant (**figure 1.1**). Ces composants diffèrent par leurs masses volumiques qui varient de 1 t/m³ (pour l'eau) jusqu'à 3 t/m³ (pour le ciment) avec des dimensions de grains qui s'étalent de 0.5 µm pour le ciment jusqu'à 25 mm pour les gravillons.

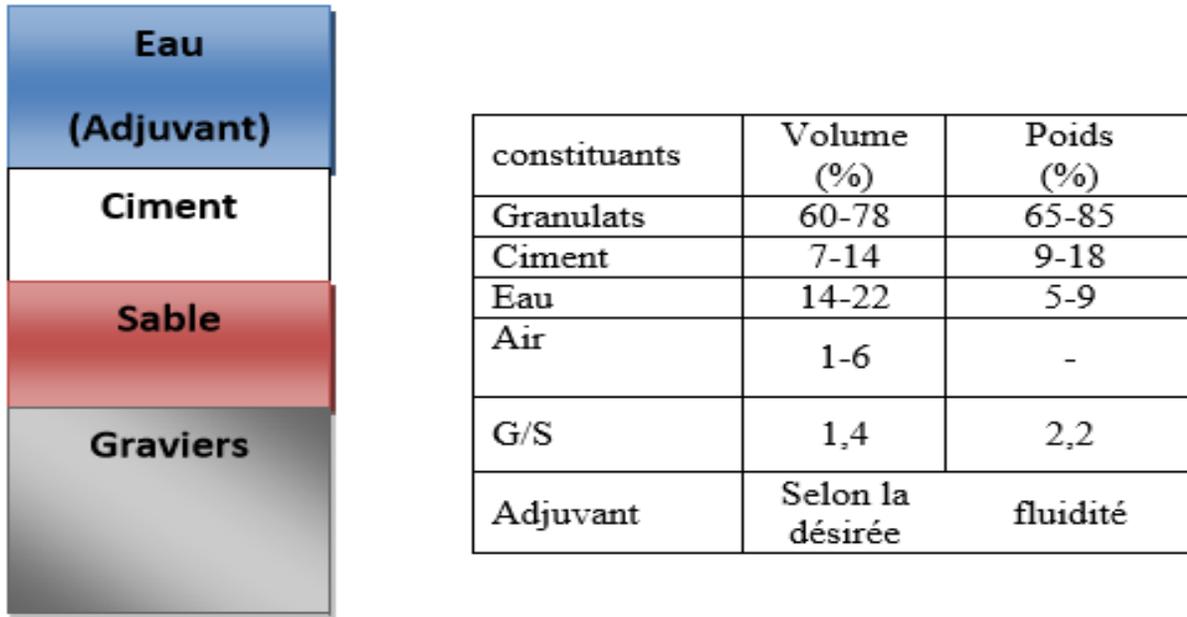


Figure 1.1 : pourcentage des constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [Deghfel Moussa, 2010].

1.3.1 Pâte de ciment :

La pâte de ciment correspond à l'ensemble (ciment + eau + air + additions + adjuvants). La pâte présente à l'intérieur du béton, joue à la fois le rôle du liant et du remplissage. Elle contribue à l'écoulement suivant un processus rhéologique lié essentiellement à sa viscosité [Nguyen, 2007]. Celle –ci peut être présentée schématiquement comme une suspension des particules suspendues dans un liquide newtonien qui est l'eau.

1.3.1.1 Ciment :

C'est un liant minéral obtenu par décarbonatation d'un calcaire et décomposition d'une argile à une température de 1450°C. Broyé sous forme d'une poudre, de couleur souvent, en contact avec l'eau forment des minéraux hydratés très stables (C-S-H).

Les principaux composés du ciment portland sont [Andriamananstilavo N., 2003]:

- Le Silicate Tricalcique (Alite)
- Le Silicate Bicalcique

- L'Aluminate Tricalcique
- L'Alumino-Ferrite Tétra calcique

Et d'autres éléments tels que les sulfates, les alcalins ...etc.

1.3.1.2 l'eau de gâchage :

L'eau est un mal nécessaire pour le béton. Elle joue trois rôles essentiels :

- Conférer au béton sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques)
- Assurer l'hydratation des grains de ciment pour la prise et le durcissement.
- Mouiller les granulats pour permettre leurs adhésions avec la pâte de ciment.

La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport E/C à une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure et la cinétique de l'hydratation. Un rapport E/C affecte la qualité du béton non seulement sur le plan de la stabilité mais aussi sur le plan mécanique.

1.3.1.3 les additions minérales :

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci [Nguyen, 2007]. Les principales additions utilisées dans le domaine du béton sont les fillers calcaires, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle, le laitier du haut fourneau et les cendres volantes. Ces additions minérales confèrent aux bétons frais une meilleure maniabilité, augmentent la cohésion et entraînent une diminution de ressuage et de la ségrégation du béton [El Barrak, 2005]. D'un autre côté, ces additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques [Lapointe, 1997].

1.3.1.4 Les adjuvants :

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau, qui incorporés à des petites doses aux bétons, permettent d'améliorer certaines de ses propriétés [Dupain, Lanchon, Saint-Arroman, 2000]. Ils permettent de réduire les coûts de mise en œuvre, et d'améliorer les propriétés des bétons

durcis. Il existe plusieurs types d'adjuvants qui sont régis par la norme **NF EN 934-2**, mais ceux qui conditionnent l'ouvrabilité du béton sont les super plastifiants et les plastifiants.

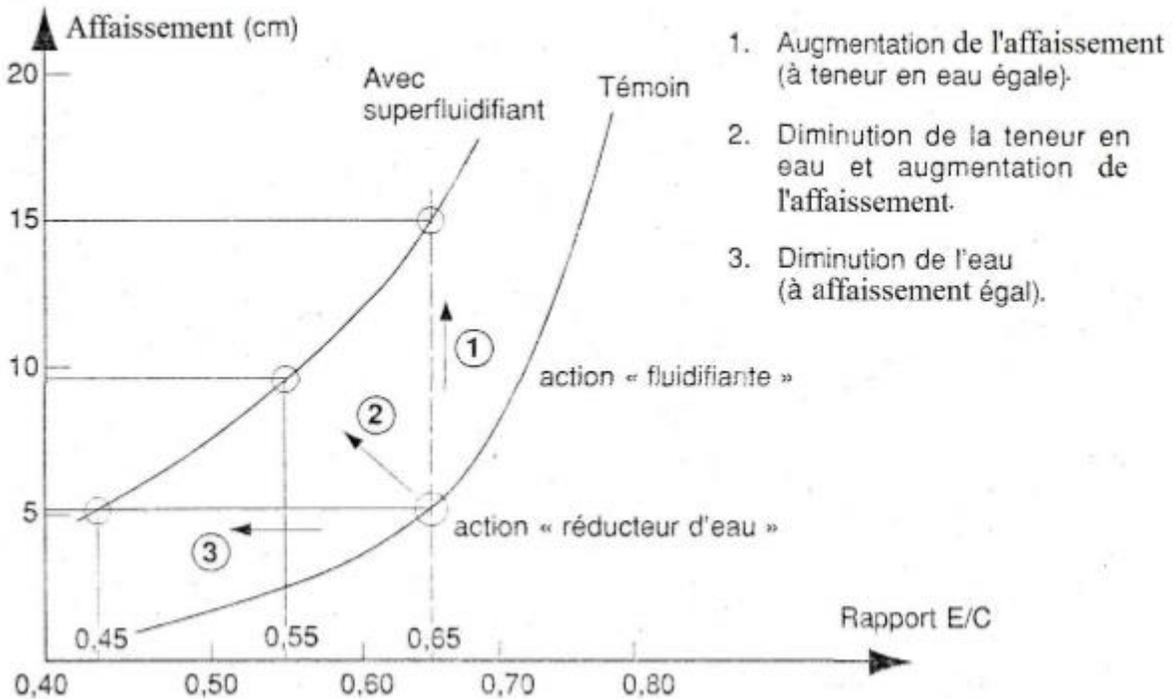


Figure 1.2 : l'utilisation des super plastifiants [Dreux G., Fiesta J., 1998].

1.3.2 Les granulats :

C'est l'ensemble des grains de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, peuvent être d'origine naturelle (sables et graviers de mer et de rivières), artificiels (argile expansée) ou issue du recyclage des déchets de l'industrie (laitier du haut fourneau, déchets de bétons broyés). Ils constituent l'ossature du béton et occupent 70 à 80% environ du volume de ce dernier [NF P 15-010].

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres.

Les principales divisions granulométriques des granulats données par la norme **XP P18-540** sont les suivantes :

- Fillers $0/D$ ou $D < 2\text{mm}$
- Sables $0/D$ ou $1 < D \leq 6.3\text{mm}$
- Graves $0/D$ ou $D > 6.3\text{mm}$
- Gravillons d/D ou $d \geq 1$ et $D \leq 125\text{mm}$

Toutefois, pour des raisons de mise en place (enrobage, espacements verticaux et horizontaux), le diamètre maximal dans un béton ne doit pas dépassé 40 mm.

1.4 Malaxage des constituants :

Les divers constituants d'un béton sont malaxés de façon à avoir un matériau de composition homogène, ayant par la suite des propriétés uniformes. Ceci se fait soit avec un malaxeur à béton qui consiste en un brassage forcé des divers constituants du béton, soit avec une bétonnière qui homogénéise le mélange par effet de gravité en soulevant un volume de matériau et en le laissant par la suite tomber dans la masse. Dans ce dernier cas, la teneur en air dans le béton sera plus élevée.

Lors d'un essai au laboratoire, il est nécessaire d'adopter rigoureusement une même procédure de malaxage des mélanges afin d'avoir des matériaux ayant des propriétés quasi constantes pour chaque gâchée. Cela concerne à la fois le temps de malaxage, la vitesse de malaxage et la séquence d'introduction des constituants dans le malaxeur.

Selon Neville [Nguyen, 2007], ces paramètres influent de manière significative sur la teneur en air du mélange. Suivant la norme **NF P 18-305**, un temps de malaxage minimal de 35 et 55 secondes est respectivement exigé pour les bétons ne comportant pas d'adjuvant ou d'additions.

Par contre, l'utilisation des adjuvants nécessite un temps plus important de malaxage pour assurer une meilleure défloculation des éléments fins et donc une meilleure dispersion.

La durée totale du cycle de malaxage (**figure 1.3**) couvre l'ensemble des opérations s'écoulant entre le début du remplissage de la cuve et la fin de vidange.

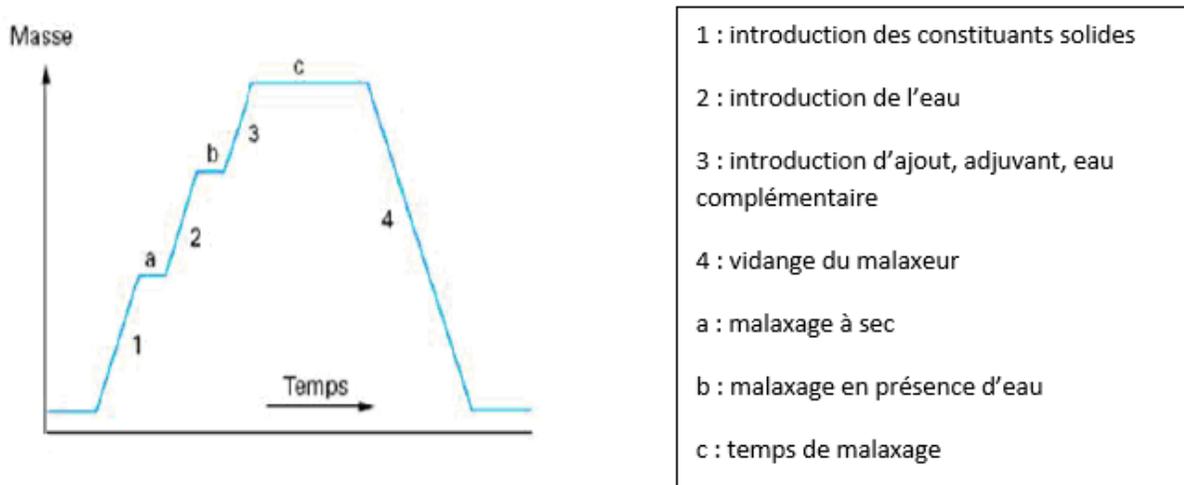


Figure 1.3 : cycle de malaxage [Ngoc-dong, 2007]

Le malaxage à sec, le malaxage humide et notamment le temps de malaxage sont des paramètres qui contrôlent l'évolution de l'homogénéité du mélange, quel que soit le type du malaxeur.

Le temps est un paramètre très important pour l'homogénéisation du béton lors de son malaxage. En fonction du temps, l'homogénéisation macroscopique est rapidement obtenue, puis l'homogénéisation microscopique est atteinte au fur et à mesure. Cette dernière consiste à défloculer les agglomérations des particules fines emprisonnant une certaine quantité d'eau et d'air. Un taux de cisaillement important exercé par les pales du malaxeur et les mouvements relatifs de gros constituants au cours de malaxage peuvent fragmenter ces agglomérats et libérer de l'eau et de l'air [Cazacliu et Col, 2006]. Ceci augmente donc la masse volumique « densité » et la compacité du béton (**figure 1.4**).

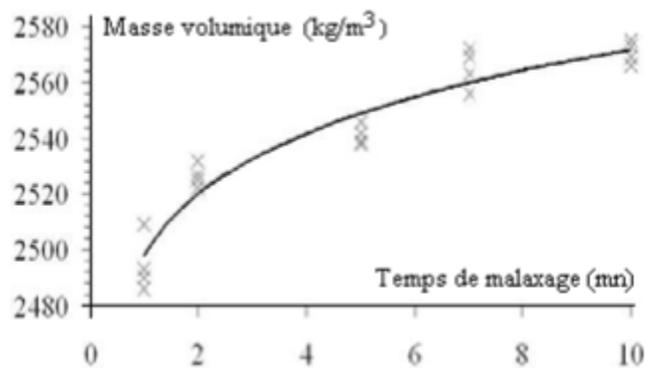


Figure 1.4 : accroissement de la densité du béton au cours de malaxage [Cazacliu et Col, 2006].

1.5 Propriétés essentielles d'un béton :

Les propriétés essentielles pour le béton sont définies comme étant la qualité qui permet de garantir la facilité de sa mise en œuvre ; qualité sur laquelle repose différents aspects du béton une fois durci (résistance, enrobage des armatures,...). Sachant que la tendance actuelle est tournée vers une multitude de techniques de bétonnage et de serrage (béton pompé, béton projeté, béton autocompactant, béton autonivelant,...), il est donc nécessaire de prendre en considération ce paramètre dans les études de formulation du béton.

Pour répondre aux conditions des cahiers de charge des ouvrages, il est nécessaire de bien caractériser les propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durci.

1.5.1 A l'état frais :

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour un remplissage parfait du coffrage et un enrobage complet du ferrailage [Dreux.G, 1979].

L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité, elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais [Gabrysia.F, 2007].

Dans le cas d'un béton ordinaire [Adamm.N, 2000] elle est principalement influencée par :

- La nature et le dosage du liant
- La forme et le dosage des granulats
- La granulométrie des constituants
- Le dosage en eau

De Larrard et col. (1993) ont développé un rhéomètre à béton, pour l'analyse des paramètres rhéologiques. Il s'agit d'étudier la relation entre la contrainte de cisaillement et la déformation dans un milieu homogène et continu. Selon **De Larrard**, le béton frais est un matériau intermédiaire entre un fluide et un empilement humide de particules. **Hu, (1995)** a montré que pour les bétons dont l'affaissement est inférieur à 10 cm, la caractérisation rhéologique n'a pas de sens.

1.6 Essais de caractérisation des bétons :

1.6.1 A l'état frais :

1.6.1.1 Essai d'affaissement au cône d'Abrams [NF P 18-451] :

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais ou ce dernier est compacté [venant M., 1973].

La démarche de l'essai consiste à remplir de béton un moule en tôle tronconique ($D = 20$ cm, $d = 10$ cm, $h = 30$ cm), le remplissage s'effectue en trois couches tassées avec une tige en acier de 16 mm de diamètre et dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche (NF P18-451). On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement.



Figure 1.5 : essai d'affaissement au cône d'Abrams.

Tableau 1.1 : classe de consistance (Affaissement) [Dupain R et al. 2000]

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	1
Plastique P	5 à 9	2
Très plastique TP	10 à 15	3
Fluide FL	> 16	

1.6.2 A l'état durci :

1.6.2.1 Essai de résistance à la compression :

La caractéristique essentielle d'un béton à l'état durci est sa résistance mécanique à la compression à 28 jours. Le béton est un matériau qui a une bonne résistance à la compression mais qui travaille mal à la traction. La connaissance de ses propriétés mécaniques est donc indispensable pour le dimensionnement et le calcul des ouvrages.

La résistance mécanique en compression du béton est mesurée par compression axiale sur des éprouvettes cylindriques 11x22 cm ou sur des éprouvettes 16x32 cm.

Les éprouvettes ne doivent être protégées contre les chocs et les vibrations au moins pendant 16 heures [NF EN 12390-2]. Après démoulage, les éprouvettes doivent être matures à l'eau ou à l'air libre à une température ambiante de 20 ± 2 °C. Les essais d'écrasement doivent être réalisés selon la norme [NF EN 12390-3/4].



Figure 1.6 : machine d'essai de compression

1.6.2.2 Essai de résistance en ultrason :

Les essais destructifs et non destructifs sont effectués sur les éprouvettes à l'âge de 14 jours. Pour chaque éprouvette, l'essai aux ultrasons est effectué en deux sens selon la méthode par transmission directe de telle façon que le sens de mesure du temps de transit soit perpendiculaire au sens de confection, selon la norme NF EN 12504-4 [N4, 05].

La **figure 1.7**, présente la courbe de corrélation établie entre les résistances à la compression par écrasement «Rc» et les vitesses ultrasoniques «V» correspondants.

On calcul la résistance en ultrason par la formule suivante :

$$R=0.342 \exp (1.004 V) \dots\dots\dots (1.2)$$

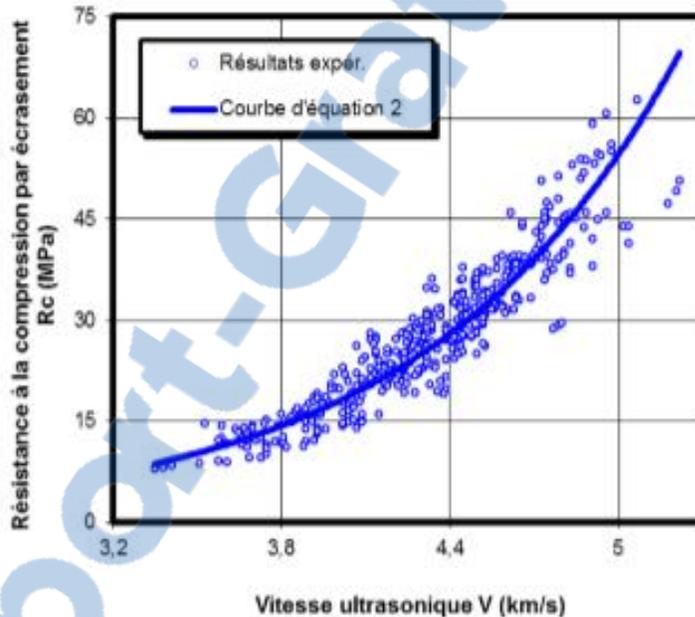


Figure 1.7 : corrélation résistance à la compression –vitesse ultrasonique [Boukhelkhal D et col, 2015]

1.7 Paramètres qui influent sur les caractéristiques du béton :

1.7.1 Influence du rapport eau/ciment (E/C) :

Le rapport eau/ciment (E/C) d'un matériau à matrice cimentaire comme le mortier et le béton peut représenter en premier lieu la qualité de la matrice cimentaire. A part son rôle majeur dans

l'hydratation, l'eau est parmi les facteurs les plus importants dans l'ouvrabilité du béton. Nous présentons des résultats d'essais de compression simple réalisés sur les bétons avec différents rapports E/C. l'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton qui entraîne la diminution de la concentration des solides.

Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais. Le dosage en ciment est très souvent relié aux propriétés mécaniques du béton et à sa durabilité. Ainsi que l'écoulement et l'ouvrabilité du béton sont reliés au rapport E/C.

Neville, (2000) a montré que la courbe qui représente la résistance en fonction du rapport E/C a approximativement la forme d'une hyperbole. Ainsi que cette relation est valable pour tous types des bétons et ne dépendait pas aux types des granulats utilisés ni de l'âge du béton. Ce résultat a été aussi trouvé par Boukli Hacene, (2010) qui a montré que cette relation dépend très peu du dosage en ciment (**figure 1.8**).

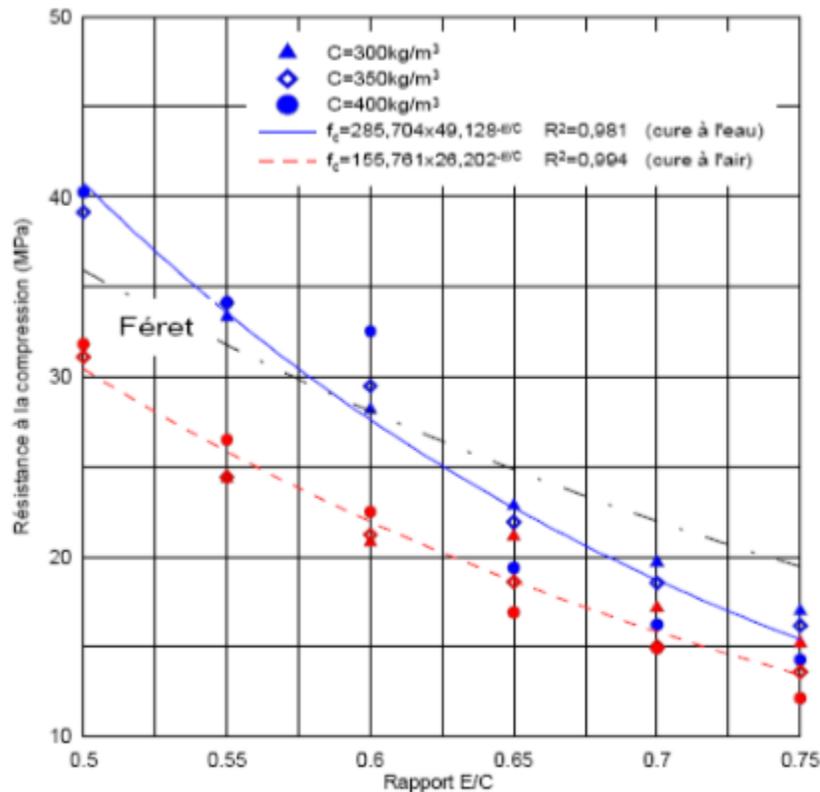


Figure 1.8 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport E/C [S.M.A Boukli Hacene, 2010].

Alexander et Ivanusec, (1982) et Kakizaki et Col, (1992) ont montré que la relation entre la résistance et le rapport C/E était linéaire pour des valeurs du rapport C/E compris 0.4 et 0.85 (figure 1.9).

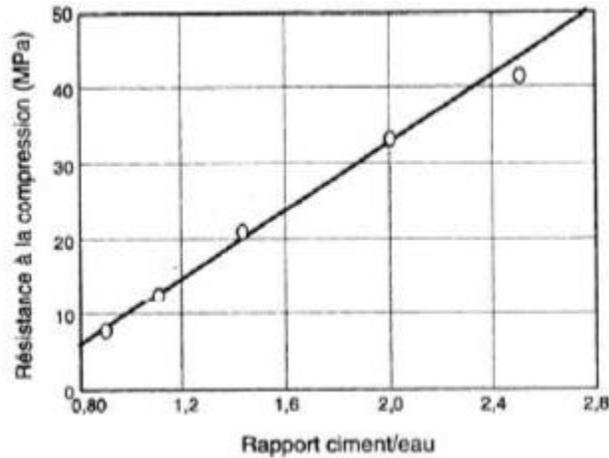


Figure 1.9 : Relation entre la résistance à la compression et le rapport C/E [Neville, 2000].

Nielsen, (1993) a montré que la linéarité de la relation entre la résistance et le rapport ciment/eau n'est plus valable pour des rapports ciment/eau supérieurs à 2.6, ce qui correspond à un rapport eau/ciment égale à 0.38. Comme on le voit sur la figure 1.10, pour des rapports ciment/eau supérieurs à 2.6, la relation avec la résistance est quelque peu différente même si elle demeure linéaire.

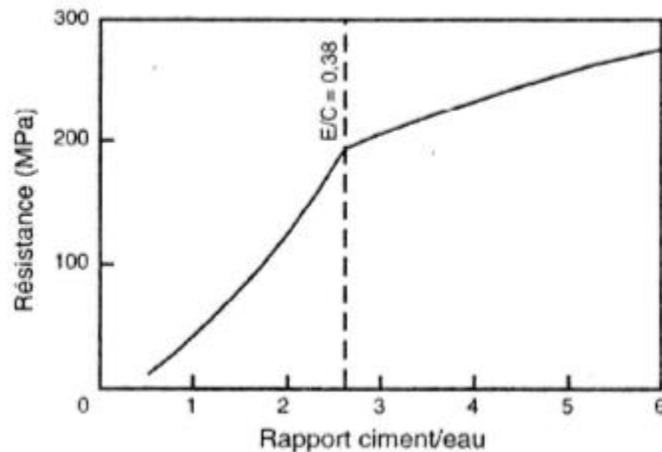


Figure 1.10 : Relation entre la résistance calculée d'une pâte pure de ciment et le rapport ciment/eau [Nielsen, 1993].

G.Dreux et J.Festa, (1998) ont montré que la relation entre la résistance à la compression et le rapport C/E d'après la formule de Bolomey est linéaire et croissante surtout dans l'intervalle de C/E entre 1.5 et 2.5 (figure 1.11).

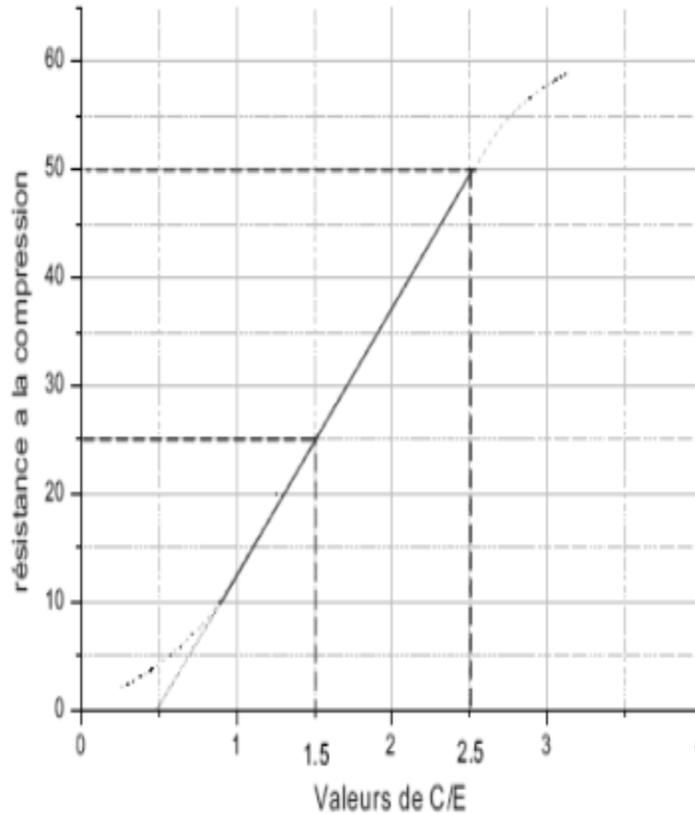


Figure 1.11 : Relation entre le rapport C/E et la résistance à la compression f_c d'après la formule de Bolomey [G.Dreux et J.Festa, 1998].

La résistance du béton peut être exprimée par la formule de Bolomey.

$$f_c = G \times C_E (C/E - 0.5) \dots \dots \dots (1.3)$$

G : coefficient de granularité égale à 0.5.

C_E : Classe vraie du ciment égale à 50 MPa.

Ollivier et Buil, (1992) ont montré que le rapport E/C conditionne la porosité de la matrice cimentaire du béton à l'état durci, qui est un paramètre qui influe beaucoup sur la durabilité du béton.

1.7.2 Influence du dosage en ciment :

Pour une même ouvrabilité, l'augmentation du dosage en ciment du béton aura pour conséquence de diminuer le rapport eau/ciment de ce béton, ce qui traduira nécessairement par une augmentation de la résistance à court terme [Baron et Ollivier, 1996].

La (figure 1.12) montre l'influence du dosage en ciment sur les résistances à court terme et sur le rapport E/C du béton [Baron et Ollivier, 1996].

Baron et Ollivier (1996) ont montré que l'augmentation du dosage en ciment amène à réduire le rapport E/C pour obtenir le même affaissement. En effet, un béton dosé à 377 kg/m^3 de ciment a demandé 192 l/m^3 d'eau, soit un rapport E/C de 0.51 pour obtenir un affaissement de 7 cm, alors qu'il a fallu 186 l/m^3 d'eau pour le béton dosé à 347 kg/m^3 de ciment, soit un rapport E/C de 0.54, il est alors possible d'expliquer ces résultats par l'accroissement des résistances d'un béton avec l'augmentation de son dosage en ciment.

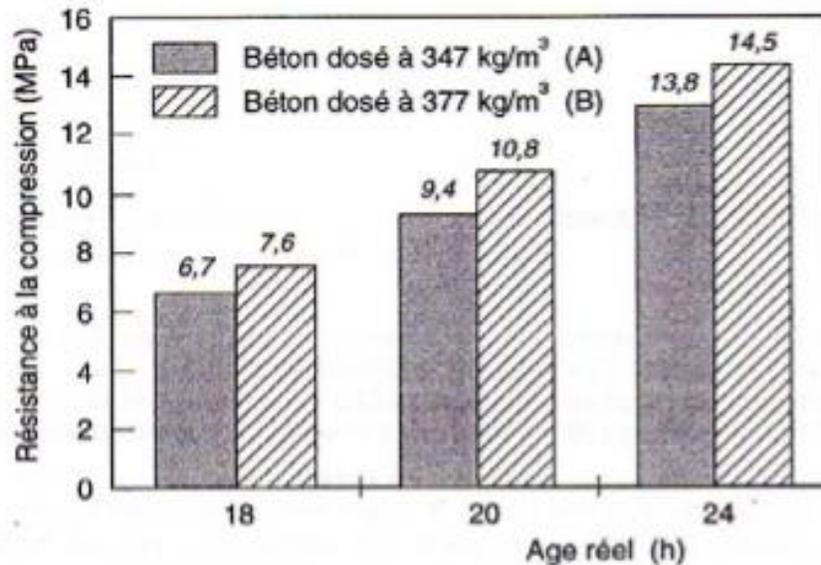


Figure 1.12 : Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton [Baron et Ollivier, 1996].

De nombreux textes réglementaires qui spécifient des dosages minimaux en ciment tel que :

- La norme **P 18 011** sur la classification des environnements agressifs qui spécifie les dosages suivants :

- $C \geq \frac{550}{\sqrt[5]{D}}$ pour des environnements à moyenne agressivité.
- $C \geq \frac{700}{\sqrt[5]{D}}$ pour des environnements à forte et très forte agressivité.

D : Dimension maximale des granulats.

- Le **BAEL 91** prescrit des dosages minimaux permettent d'obtenir des résistances caractéristiques dans les cas courants (CC) et les cas d'autocontrôle surveillé (AS) :

Tableau 1.2 : Dosage en ciment [BAEL 91].

Classe du ciment	32,5N et 32,5R		42,5N et 42,5R	
	CC	AS	CC	AS
$D_{\max}=16$	300 kg/m ³			
20	350 kg/m ³	325 kg/m ³	325 kg/m ³	300 kg/m ³
25	à justifier	400 kg/m ³	375 kg/m ³	350 kg/m ³
30	non admis	à justifier	à justifier	à justifier

1.7.3 Influence du type de ciment :

La démarche de formulation d'un béton passe par le choix du type de ciment. L'influence de ce paramètre sur la résistance à court terme est présentée sur la **figure 1.13**. Cette figure montre que le choix d'un ciment CPA-CEM I 52,5 R développera, à dosage identique dans le béton, des résistances à court terme considérablement supérieures à celles d'un ciment CPJ-CEM II 32,5 R, c'est-à-dire que, plus la classe de résistance est élevée, plus les résistances sont élevées, à toutes échéances. De même, un CPA-CEM I 52,5 R développe des résistances à court terme beaucoup plus rapidement qu'un CPA-CEM 52,5, tout en présentant à 28 jours des résistances équivalentes [Baron et Ollivier, 1996].

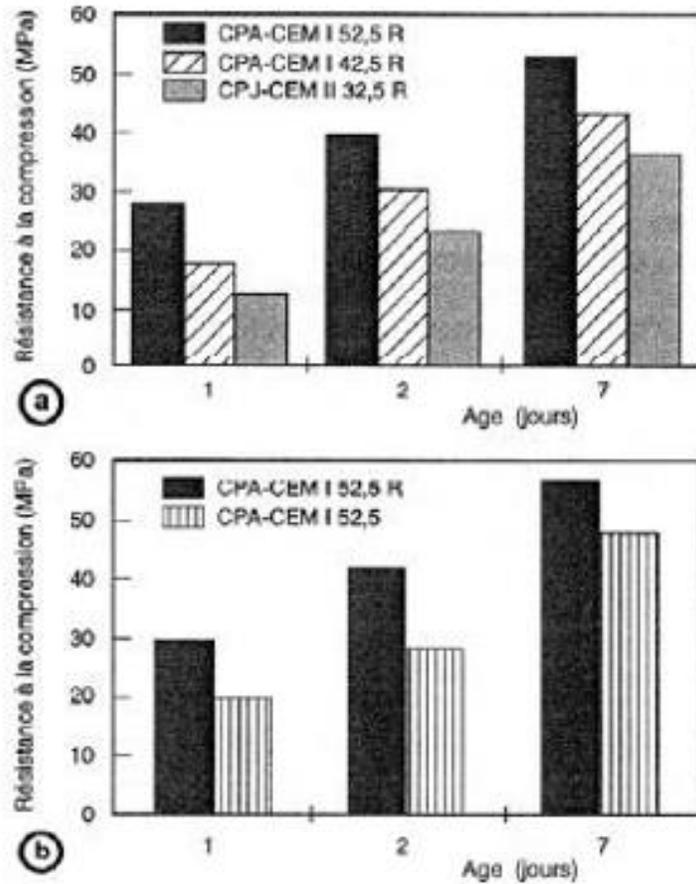


Figure 1.13 : Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme [Baron et Ollivier, 1996].

1.7.4 Influence du rapport granulat/ciment :

Le rapport G/S est un facteur de deuxième importance quand à la résistance, mais, pour un rapport E/C constant, Erntroy et Shacklock, (1954) cités par Neville, (2000), ont montré qu'un béton plus faiblement dosé était plus résistant (figure 1.14).

Cependant un optimum de G/C a pu être distingué qui est de l'ordre de 3.

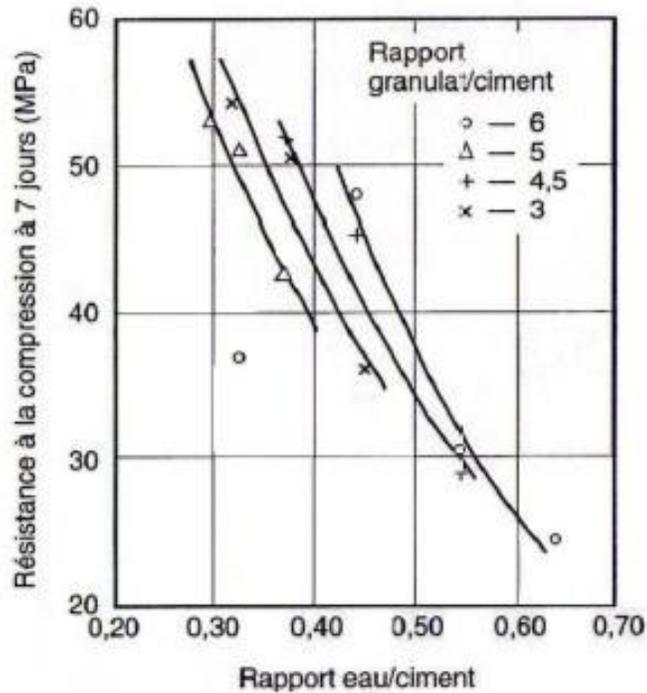


Figure 1.14 : Influence du rapport G/C sur la résistance du béton [Neville, 2000].

Autres études portant sur l'influence de la teneur en granulat sur la résistance des bétons, pour une qualité de pâte de ciment donnée, indiquent que lorsque le volume des granulats (exprimé en pourcentage du volume total) augmente de 0 à 20%, il y a une diminution de la résistance à la compression alors qu'entre 40 et 80% on remarque une augmentation de la résistance [Stock et Col, 1979]. L'allure générale de ce comportement est représentée sur la (figure 1.15). Cette tendance se vérifie quel que soit le rapport eau/ciment [Kawakami, 1972].

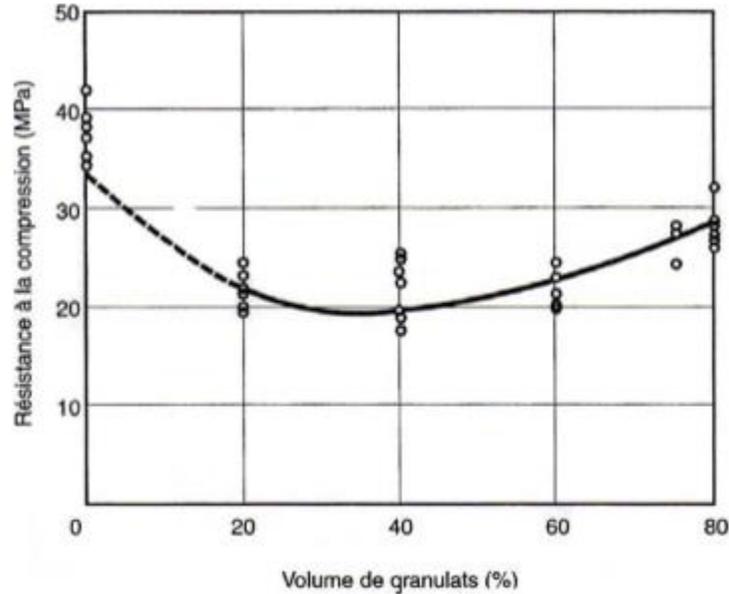


Figure 1.15 : Relation entre la résistance à la compression de cylindres de béton (10×30cm) et le volume de granulats pour un rapport E/C constant de 0.5 [Stock et Col, 1979].

Stock et Col. (1979) ont aussi publié quelques expériences originales dans lesquelles ils ont réalisé une série de bétons avec différents volumes de granulats de même granulométrie liés par la même matrice de ciment. Ils ont évité la ségrégation dans les mélanges fluides par une mise en rotation des moules après mise en place du matériau. Les essais de résistance à la compression sur les éprouvettes cubiques ont donné des résultats assez dispersés. Il est à noter que l'effet du granulat peut être modifié par une augmentation de l'air occlus quand l'ouvrabilité diminue [De Larrard et Belloc, 1999].

1.7.5 Influence du squelette granulaire :

Moins influente que le dosage en ciment ou le dosage en eau, la composition granulométrique du mélange n'intervient que d'une manière relativement faible sur la plupart des propriétés du béton.

Sauf pour la résistance à la compression ou nous pouvons voir (**figure 1.16**) que pour des valeurs de (G/S) supérieures à 2.2 la résistance à la compression augmente considérablement, une augmentation certainement positive mais prise sur le compte de l'ouvrabilité, parce qu'en pratique on ne dépasse pas les valeurs de 1.5 à 1.6 pour avoir un béton ouvrable [G.Dreux et J.Festa, 1998].

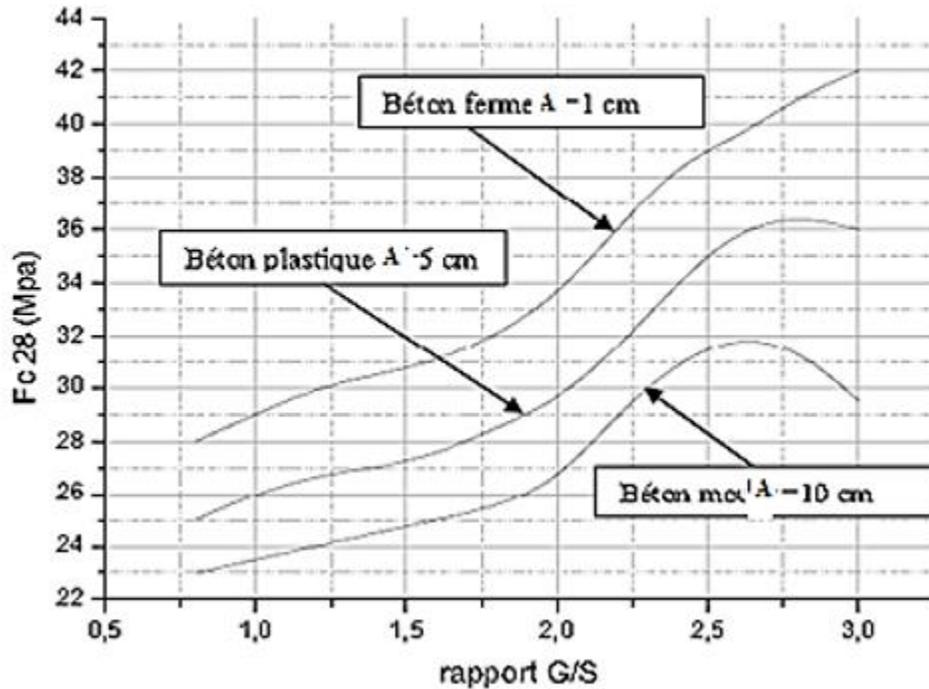


Figure 1.16 : Variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction du rapport G/S [G.Dreux et J.Festa, 1998].

1.7.6 L'influence de la taille maximale des granulats (D_{max}) :

Walker et Bloem (1960) ont publié un article qui suscita à l'époque beaucoup de discussions [Alexander et Col, 1961] : la majorité des résultats présentés montraient un effet négatif de la dimension maximale des granulats (D_{max}) sur la résistance à la compression, à rapport E/C constant. Cette constatation étonna la communauté scientifique, celle-ci présumant généralement qu'avec un D_{max} important, le béton, plus compact, présenterait une résistance mécanique supérieure et une meilleure durabilité.

L'effet négatif de l'augmentation de la dimension maximale des granulats dans le béton s'applique à l'échelle de toutes les grosseurs, mais l'effet de la dimension des grains sur la diminution de la demande en eau est particulièrement importante en dessous de 38,1 mm. Pour des dimensions supérieures, le bilan des deux effets dépend du dosage du béton [Neville, 2000], (figure 1.17).

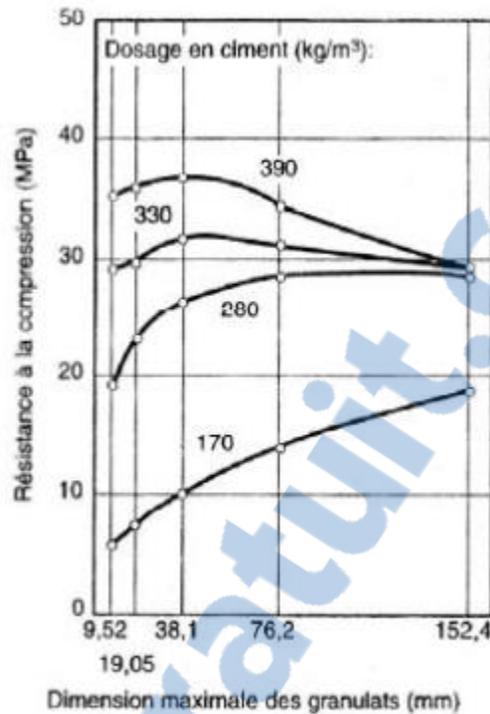


Figure 1.17 : Influence de la dimension maximale des granulats sur la résistance à la compression à 28 jours pour des bétons ayant différents dosage en ciment [Neville, 2000].

1.7.7 Influence du squelette granulaire sur l'affaissement :

Une étude réalisée sur des bétons autobloquants a fait ressortir que l'augmentation de la fraction volumique granulaire avait une influence négative sur les propriétés rhéologiques des bétons [O.Taleb, F.Ghomari, S.M.A. Boukli Hacene, 2013].

Cependant l'optimisation du squelette granulaire et par conséquent le paramètre G/S est essentielle pour améliorer la fluidité du mélange [S.M.A. Boukli Hacene, 2010].

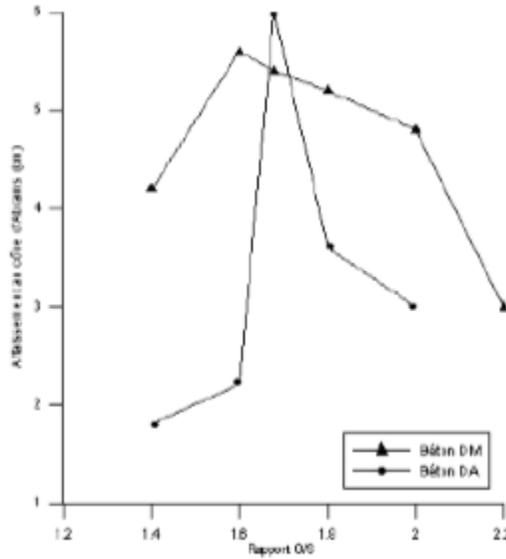


Figure 1.18 : Optimisation du rapport G/S en fonction de l'affaissement [S.M.A. Boukli Hacene, 2010].

1.7.8 Influence des adjuvants :

L'incorporation d'un superplastifiant au béton a entraîné une modification de l'ouvrabilité, chacun selon son dosage et sa nature chimique. Les figures 1.19 (a et b) présentent l'évolution de l'affaissement pour différents dosages en superplastifiants (SP1), (SP2) et différents rapports (E/C). Comme on pouvait s'y attendre, l'ouvrabilité augmente avec le dosage en eau et en superplastifiant

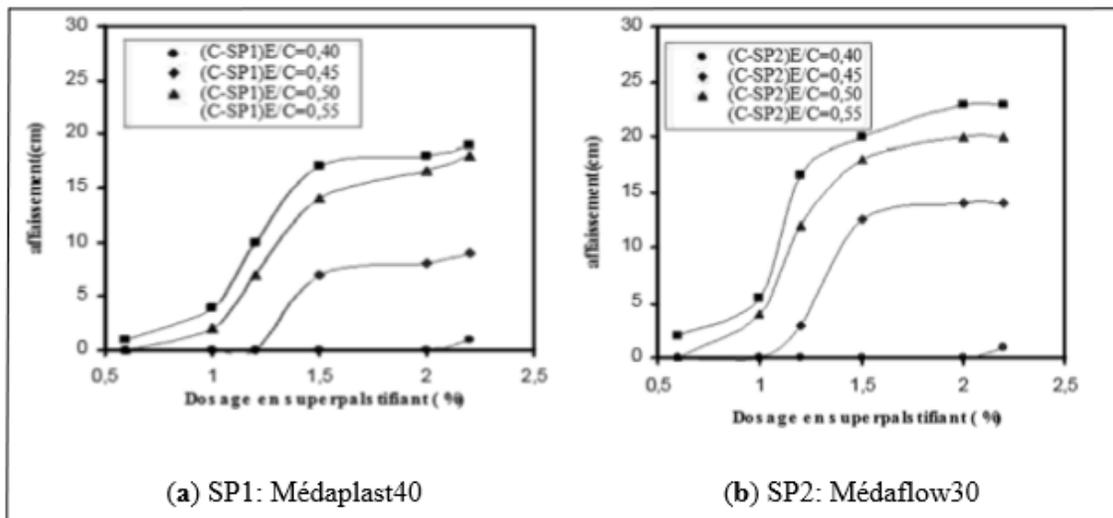


Figure 1.19 : Effet du dosage en superplastifiant sur l'affaissement [Adjoudj et col, 2009].

La figure 1.20 (a) et (b) montrent la variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant (SP1 et SP2) avec un rapport E/C égal 0.55.

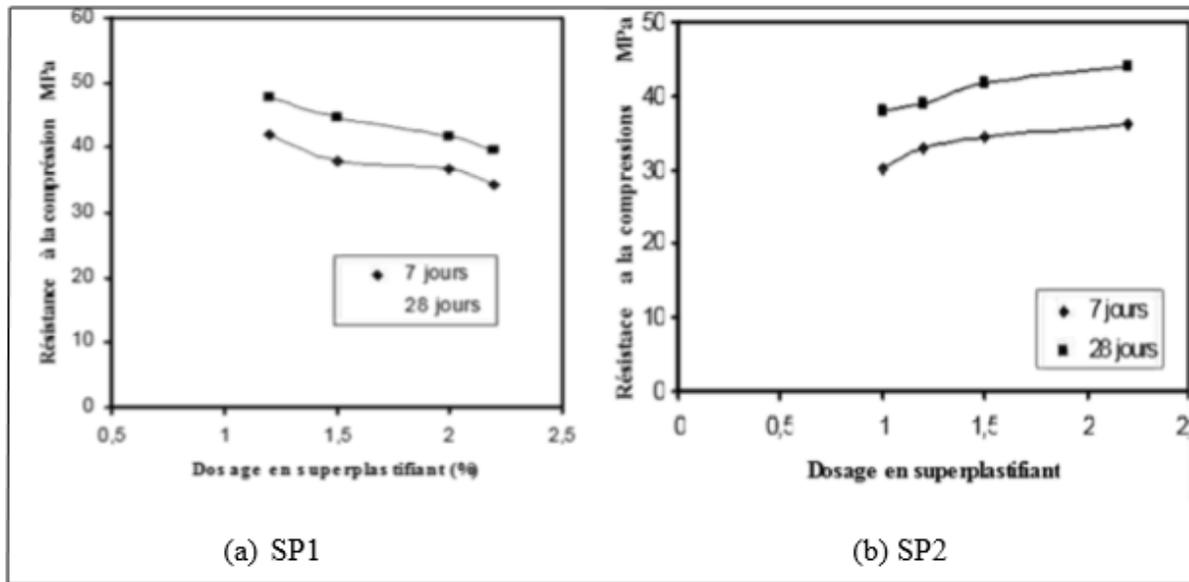


Figure 1.20 : Variation de la résistance à la compression d'un béton adjuvanté par SP1 et SP2 [Adjoudj et col, 2009].

L'incorporation de SP1 au ciment composé à base de calcaire a provoqué une chute de résistance significative. Ce superplastifiant est incompatible avec ce type de ciment. Par contre, l'emploi du superplastifiant SP2 augmente considérablement la résistance à la compression, ce qui permet de justifier l'activité de ce produit à favoriser l'hydratation du ciment et à améliorer la microstructure.

1.8 Conclusion :

Le béton est un matériau qui s'est beaucoup modernisé avec le temps grâce à des recherches avancées sur ses constituants et de l'interaction entre eux. Toutefois, trois paramètres semblent avoir un grand impact sur le béton à l'état frais et durci : le dosage en ciment, le rapport E/C et le rapport G/S.

CHAPITRE 2

METHODES DE FORMULATION DES BETONS

2.1 Méthodes de formulation des bétons :

2.1.1 Introduction :

La formulation d'un béton doit intégrer les exigences de la norme **NF EN 206/CN**, qui prend en considération des critères de durabilité en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton. La norme **NF EN 206/CN** est plus exigeante vis-à-vis de la quantité minimale de ciment à incorporer dans le mélange ainsi que la quantité d'eau maximum tolérée.

De même, pour chaque environnement donné, une résistance garantie à 28 jours sur éprouvettes sera exigée aux producteurs, qui peuvent utiliser des dosages de ciments plus ou moins supérieurs à la recommandation de la norme si c'est nécessaire. D'autres exigences de la norme **NF EN 206/CN** imposent l'emploi des ciments particuliers en fonction de l'agressivité du milieu, ainsi que l'utilisation des adjuvants conférant des propriétés différentes à la pâte de ciment sur le plan rhéologique (la plasticité, la quantité d'air occlus, etc...).

Et pour cela nous allons parler dans ce chapitre sur quelques méthodes de formulations des bétons.

2.1.2 Méthodes de formulations :

2.1.2.1 Méthode de Bolomey :

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris) ; dont la courbe soit la plus proche que possible de la courbe de référence théorique [**Dreux, Festa, 1998**].

La formule de base est la suivante :

$$P = A + (100 - A) \sqrt{d/D} \dots\dots\dots (2.1)$$

Avec :

P est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d

D est le diamètre du plus gros grain

A varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort. Cette méthode aboutit théoriquement tout au moins à une granularité continue.

2.1.2.2 Méthode de Caquot:

Caquot cité dans [Dreux et Festa, 1998] a proposé, dès 1937, une approche théorique pour déterminer une courbe granulométrique quasi optimale, pour un mélange granulaire non borné (en termes de diamètre maximal et minimal), puis pour une étendue granulaire donnée. Cette approche néglige toutefois les conditions de mise en œuvre, la forme des granulats et fait des hypothèses fortes sur les interactions (effet de paroi et de desserrement) entre les grains.

2.1.2.3 Méthode de valette :

Valette a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite cependant un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosages des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum de sable » ou encore « dosage des bétons à granularité discontinue » [Dreux et Festa, 1998]. Puisque la méthode est essentiellement expérimentale elle repose donc, sur l'appréciation de l'opérateur concernant la convenance du béton, il doit être un praticien connaisseur en la matière.

2.1.2.4 Méthode de Faury :

Cette méthode qui date de 1942 s'inspire des travaux de Caquot Faury.

Faury prend comme échelle :

- en abscisse, la $\sqrt[5]{d}$,
- en ordonnée, la décimale suivant le pourcentage en volume absolu de matière passant à travers les passoires correspondantes.

La granulométrie optimum d'un béton est un mélange (dans une certaine proportion) de deux sortes de grains (sable et gravier).

La courbe de référence à suivre se compose de deux tronçons de droite.

La première AB donne la granulométrie des grains fins et moyens $0 / \frac{D}{2}$. Cette droite coupe l'axe des abscisses en un point fixe A d'abscisse $d_0 = 0.0065$.

La deuxième droite est celle de gros grains $D/\frac{D}{2}$. L'ordonnée Y de $D/2$, appelée point de brisure, indique le pourcentage en volume des grains $0/\frac{D}{2}$. Sa valeur est donnée par la formule expérimentale.

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75} \dots\dots\dots(2.2)$$

Où D : grosseur maximum de l'agrégat en mm

R : rayon moyen du coffrage en mm

A : coefficient tenant compte de la forme des agrégats et de la consistance du béton.

B : dépend du serrage. Il varie de 1 pour une vibration puissante à 1.5 pour un serrage moyen.

2.1.2.5 Méthode de Joisel :

S'inspirant comme Faury de la théorie de Caquot mais en la généralisant, Joisel propose de considérer que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale, est fonction de $\sqrt[m]{d}$, m dépend de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimension uniforme selon les moyens de serrage ; m peut alors varier de 3 à 10.

Joisel prend comme échelle en abscisse, la $\sqrt[m]{d}$ au lieu de $\sqrt[5]{d}$ (Faury) ou m variant avec le serrage des matériaux.

Comme dans la méthode de Faury, on aboutit donc en principe à une granularité continue sauf, bien entendu, si les granulats dont on dispose en pratique présentent une discontinuité. Toutefois, pour éviter la cassure de la droite de référence au point d'abscisse $D/2$, Joisel a déterminé l'échelle de l'intervalle $\frac{D}{2} / D$ de façon à n'avoir qu'une simple et unique droite, c'est l'avantage de cette méthode. En revanche, il faut employer un graphique dont l'échelle des abscisses est variable d'une échelle à l'autre, d'un type de granulat à un autre. C'est ensuite par une méthode graphique dont nous nous inspirons que se déterminent les pourcentages des divers granulats [Dreux et Festa, 1998].

2.1.2.6 Méthode de Dreux Gorisse :

Cette méthode repose sur l'optimisation du squelette granulaire. Dreux a mené une large enquête pour recueillir des données sur des bétons satisfaisants. En combinant les courbes granulaires obtenues, il a pu fonder une approche empirique pour déterminer une courbe granulaire de référence ayant la forme de deux lignes droites dans un diagramme semi-logarithmique **figure 2.1**

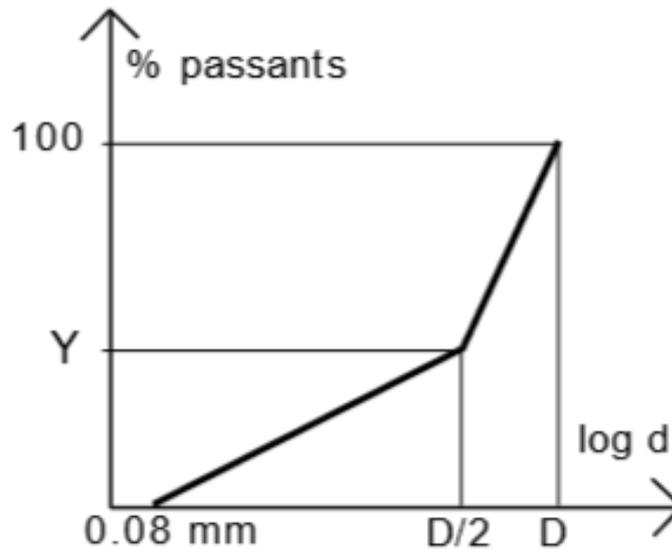


Figure 2.1 : courbe granulaire de référence selon Dreux [Dreux 1970].

La méthode de Dreux-Gorisse intègre étapes suivantes :

Etape1 : Examen de la structure (dimensions, espacement entre armatures, enrobage, etc.).

Etape2 : Détermination de la résistance à la compression. Elle est déduite de la résistance désirée et d'un coefficient probable de variation.

Etape3 : Sélection de la consistance du béton frais. Cette spécification est définie par rapport à l'affaissement.

Etape4 : Détermination de D_{max} , qui sera fixé en fonction des dimensions de la structure analysée à l'étape 1.

Etape5 : Calcul du dosage en ciment : Le rapport ciment/eau est déduit tout d'abord de la résistance souhaitée, en utilisant la relation de Bolomey qui tient compte de la résistance du ciment et d'un facteur ajusté aux granulats. Le dosage en ciment est soit fixé préalablement soit déduit à partir des abaques d'ouvrabilité et de résistance.

Etape6 : Calcul de la quantité (totale) en eau : Elle est calculée à partir du dosage en ciment déterminée précédemment et du rapport ciment/eau. A ce stade, une correction peut être faite en fonction du D_{max} . La quantité d'eau à mettre dans le malaxeur est alors égale à la valeur corrigée tout en considérant aussi la teneur en eau et l'absorption des granulats.

Etape7 : Caractérisation du sable : Le sable est soit accepté, soit rejeté sur la base de sa propreté. Sa courbe granulométrique est reportée sur un diagramme standard. Si le module de finesse est trop élevé (sable trop grossier), un sable fin correcteur est ajouté.

Etape8 : Tracé de la courbe granulaire de référence. L'ordonnée du point de brisure Y est déterminée par les facteurs suivants : D_{max} , dosage en ciment, intensité de la vibration, forme des grains et module de finesse du sable. Le **tableau 2.1** résume les déplacements de Y en fonction d'une augmentation de ces paramètres.

Tableau 2.1 : paramètres pris en compte dans la détermination de Y.

Paramètres	Evolution de Y
D_{max}	↓
Dosage en ciment	↓
Vibration	↓
Forme des particules	Roulées ou concassées
Module de finesse	↑

Etape9 : Détermination du volume solide du mélange frais qui dépend de la compacité.

Etape10 : Détermination des fractions granulaires. Les proportions respectives (en volume) sont déterminées graphiquement, à l'aide de la courbe de référence (étape8). Alors, pour chaque granulat, le volume, pour un mètre cube de béton, est calculé en multipliant le volume solide par la proportion trouvée. Enfin, en multipliant le volume de chaque granulat par sa masse volumique, on obtient la masse du granulat considéré.

A ce stade, la composition théorique est connue ; elle doit être testée sur des mélanges de laboratoire, et ajustée (si nécessaire).

2.1.2.7 Méthode de Baron Lesage :

Cette méthode n'est pas en soi une méthode de formulation, mais plus une technique pour optimiser le squelette granulaire d'un béton [**Baron et Lesage, 1976**]. L'essai utilisé pour

caractériser la maniabilité est le maniabilimètre LCL (ou essai d'écoulement) [**Baron et Lesage, 1969**]. Le principe est de mesurer le temps mis par un échantillon de béton pour s'écouler sous vibration jusqu'à un certain repère. Les proportions optimales des granulats sont supposées donner le temps d'écoulement minimum, pour une quantité donnée de ciment et d'eau. Une fois les proportions granulaires repérées, les dosages en eau et ciment sont ajustés expérimentalement, de sorte que le mélange présente la maniabilité et la résistance souhaitées. On suppose, dans cette méthode, que les proportions optimales de granulats ne dépendent pas de la quantité de ciment.

La méthode baron Lesage a l'avantage de ne dépendre d'aucune formule ou table qui pourrait être suspectée de ne s'appliquer qu'à certains types de matériaux. De ce point de vue, elle peut être qualifiée de fondamentale et de scientifique. Par contre, la nécessité de réaliser un certain nombre de gâchées expérimentales, pour trouver les proportions optimales de granulat, est assez contraignante. La méthode devient surtout lourde quand plus de deux granulats doivent être proportionnés [**de Larrard, 2000**].

Les différentes étapes de la méthode peuvent se résumer comme suit :

- une composition arbitraire (rapport eau/ciment) et un volume de pâte sont fixés (découlant généralement d'une première composition déterminée par une méthode empirique du type Dreux [**Dreux et Festa, 1998**] ou Faury [**Faury, 1958**].
- ces paramètres étant maintenus constants, on optimise le squelette en recherchant le rapport gravier/sable qui donne la meilleure maniabilité ou affaissement. Le succès de la méthode provient de l'optimisation du rapport gravier/sable.

Toutefois, les bétons obtenus par cette approche ont deux grandes qualités :

- L'homogénéité car il y a juste ce qu'il faut en éléments fins pour remplir les interstices des gros granulats.
- la régularité car les fluctuations des proportions du squelette n'ont que peu d'influence sur la maniabilité du béton (les variations sont faibles au voisinage de sa valeur optimale).

La **figure 2.2** montre les optima, en terme d'affaissement et de maniabilité obtenues par de Larrard (**2000**), en utilisant la méthode de Baron Lesage sur des bétons frais, à quantité d'eau et de ciment constantes.

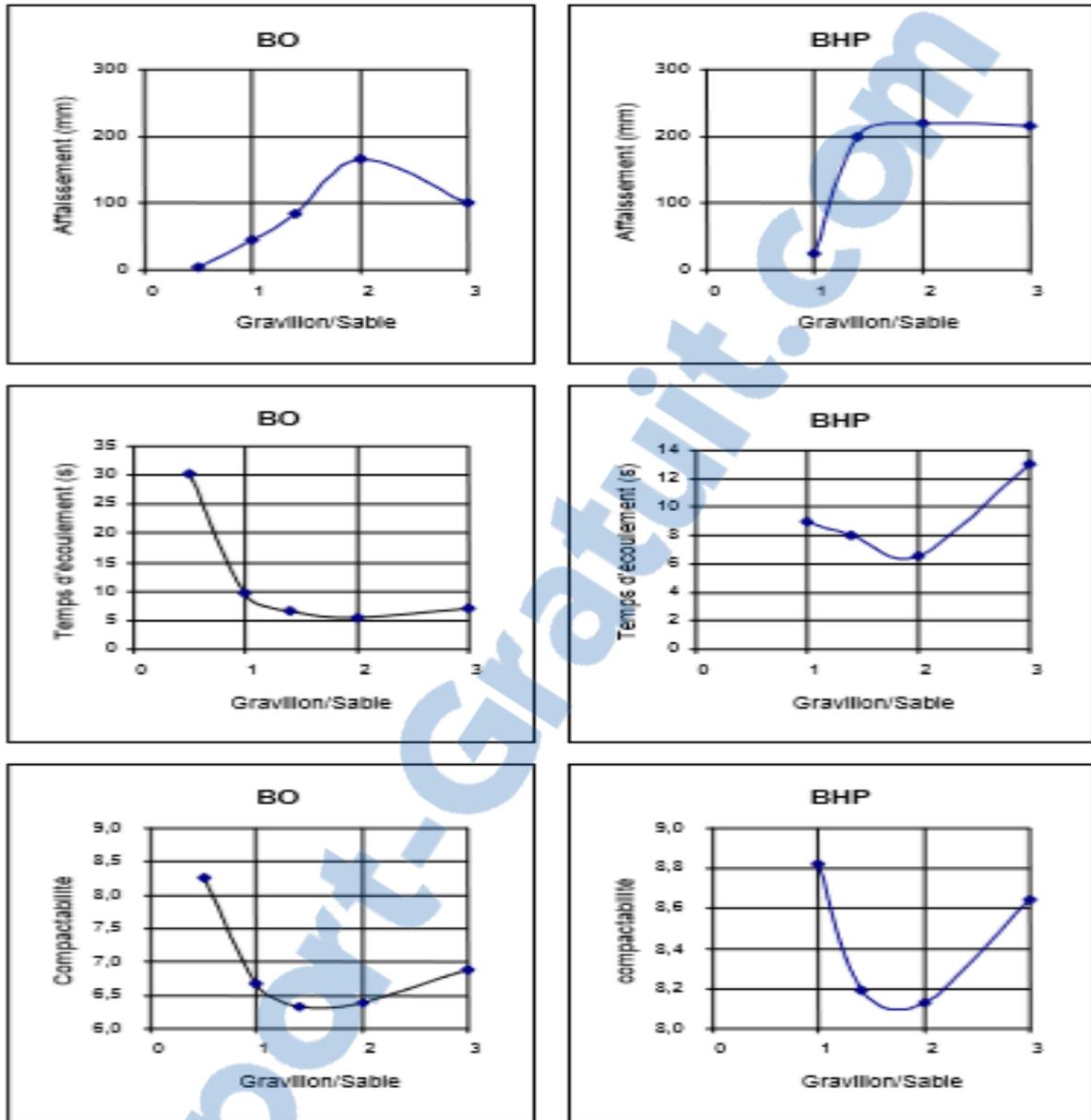


Figure 2.2 : effet du rapport gravillon/sable (G/S) sur les propriétés du béton frais [De Larrard, 2000].

2.1.2.8 Méthode des volumes absolus :

La méthode des volumes absolus est une méthode de pré-formulation adaptée au béton. Elle permet la composition de mélanges dont le volume total est précisé en amont.

Cette démarche est aussi la plus adaptée pour un travail de recherche car elle permet de varier chaque proportion des composants sans pour autant changer le volume total. On a :

$$V_{\text{ciment}} + V_{\text{eau}} + V_{\text{sable}} + V_{\text{gravier}} + V_{\text{vide}} = V_{\text{total}}$$

- Si les composants sont exprimés en masse, la relation devient :

$$\frac{M_C}{\rho_C} + \frac{M_E}{\rho_E} + \frac{M_S}{\rho_S} + \frac{M_G}{\rho_G} + V_V = V_t \dots \dots \dots (2.3)$$

$\rho_C, \rho_E, \rho_S, \rho_G$: Masses volumiques absolues.

- L'humidité que peut contenir les granulats peut être prise en compte en la retranchant et la rajouter au volume de l'eau, les masses volumiques absolues des matériaux humides seront remplacées par les masses volumiques absolues sèches.

Cette opération peut être négligée lorsqu'il s'agit de petites gâchées et dont les composants son préparés par pesée [Adam M. Neville, 1992].

- Si d'autres composants sont utilisés, ils seront introduits de la même manière que précédemment dans l'équation 2.3.
- Le seul inconvénient que peut altérer la précision de cette méthode réside dans l'évaluation du volume de l'air occlus que va contenir le mélange après.

2.1.2.9 Méthode Britannique :

Cette méthode révisée en 1988 (BRE 1988, citée par [Neville, 2000]), repose sur les étapes suivantes :

Etape 1 : Détermination du rapport E/C en fonction des critères de durabilité.

Etape 2 : Détermination de la quantité d'eau : Le principe est très similaire à celui adopté dans la méthode américaine ACI 211. La demande en eau dépend du D_{max} et de l'affaissement requis.

Etape 3 : Calcul de la quantité de ciment : Elle s'obtient en divisant la quantité d'eau par le rapport E/C. Ce dosage en ciment doit respecter les exigences de durabilité sans pour autant être trop élevée afin d'éviter le retrait du au dégagement de chaleur d'hydratation.

Etape 4 : Détermination de la masse totale de granulat : Connaissant la masse du ciment et de l'eau, il est possible d'en déduire le volume total des granulats par unité de volume du béton.

Etape 5 : Détermination du rapport sable/granulats : En utilisant les valeurs recommandées, on trouve ce rapport en fonction de la maniabilité requise (exprimée par l'affaissement ou par le temps d'écoulement vebe).

2.1.2.10 Méthode américaine ACI 211 :

Cette méthode ACI 211 est probablement l'une des plus utilisée. Elle est basée essentiellement sur les travaux des chercheurs américains [Abrams, 1994].

La démarche englobe les étapes suivantes :

Etape 1 : Choix de l'affaissement.

Etape 2 : Choix de la taille maximale des granulats (D_{max}).

Etape 3 : Estimation de la quantité d'eau et d'air. L'eau est déterminée par D_{max} et par l'affaissement requis, alors que l'air dépend de D_{max} .

Tableau 2.2: Dosage approximatif en eau de gâchage et teneur en air pour différents affaissements et dimension maximale nominale du gros granulats selon la norme **ACI 211.1-91**

Affaissement (mm)	Eau (kg/m ³) pour les dimensions maximales des granulats ci-dessous							
	9,5	12,5	19	25	37,5	50	75	150
Béton sans air entraîné								
25 à 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 à 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 à 175	243	228	216	202	190	178	160	-
air piégé (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Béton à air entraîné								
25 à 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 à 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 à 175	216	205	197	184	174	166	154	-
Teneur en air totale (%) pour :								
amélioration de la maniabilité	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
exposition modérée	6,0	5,5	5,0	4,5	4,5	4,0	3,5	3,0
exposition sévère	7,5	7,0	6,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0

Etape 4 : Sélection du rapport E/C : Ce rapport est choisi en tenant compte de la durabilité (valeur maximale spécifiée) et de la résistance à la compression. Pour cette dernière, le tableau Fournit le rapport E/C en fonction des classes de résistance.

Tableau 2.3 : Résistances à la compression approximatives de bétons confectionnés avec un rapport E/C de 0,5 suivant la méthode Britannique de 1988 [Neville, 2000]

Type de ciment	Type de gros granulat	Résistance à la compression* (MPa) à l'âge de (jour)			
		3	7	28	91
Portland ordinaire (Type I) Portland résistant aux sulfates (Type V)	Non concassé	22	30	42	49
	Concassé	27	36	49	56
Portland à prise rapide (type III)	Non concassé	29	37	48	54
	Concassé	34	43	55	61
* Mesurée sur cube					

Etape 5 : Calcul de la quantité de ciment. Ce calcul est simplement fait à partir de la quantité d'eau et du rapport E/C déterminé précédemment.

Etape 6 : Estimation de la quantité de gravillon. La masse volumique en vrac du gravillon, mesurée selon une méthode normalisée (piquage à sec), est déterminée en premier. Elle est alors multipliée par un coefficient tabulé, qui dépend de la taille maximale du granulat et du module de finesse du sable.

Tableau 2.4 : Volume en vrac de gros granulat par unité de volume de béton selon la norme **ACI 211.1-91**

Dimension maximale du granulat mm	Volume en vrac de granulat séché et tassé par unité de volume de béton pour un module de finesse du granulat fin de			
	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
20	0,66	0,64	0,62	0,60
25	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,82	0,80	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Les valeurs données permettent d'obtenir un mélange de maniabilité acceptable pour un ouvrage en béton armé. Pour obtenir un béton un peu moins maniable, par exemple pour la construction de routes, les valeurs peuvent être augmentées d'environ 10%. Pour un béton plus maniable, mis en place par pompage par exemple, les valeurs peuvent être réduites jusqu'à 10% environ.

Etape 7 : calcul de la quantité de sable. Cette quantité est calculée par différence entre le volume unité de la gâchée et les autres volumes calculés précédemment.

Etape 8 : ajustement de la formule.

2.1.2.11 Méthode des plans d'expériences :

L'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante dans le sens où elle fait réduire le nombre des mélanges tout en faisant varier plusieurs paramètres (facteurs) à la fois, ce qui va nous permettre d'évaluer leurs influences ainsi que leurs interactions sur les caractéristiques des bétons.

Parmi ces facteurs, on peut citer : le dosage en ciment, le dosage en additions, le dosage en eau, le rapport E/L, le rapport Additions/Ciment, le dosage en adjuvant, le rapport G/S,...

L'analyse statistique peut être réalisée en utilisant certains logiciels tels que le Minitab, Statistica.... Ainsi, des modèles mathématiques obtenus par régression peuvent être développés en fonction des différents facteurs.

Les plans d'expériences sont un instrument bien adapté à la recherche-développement chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres. Bien utilisés, ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps et de l'argent, tout en parvenant à un résultat encore mieux assuré. Leur application au béton s'impose chaque fois que l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences différentes.

En termes d'expériences, il suffit de fixer, à un niveau constant, toutes les variables d'un problème sauf celles dont on espère étudier l'influence (**figure 2.3**) [Pillet, 1992].

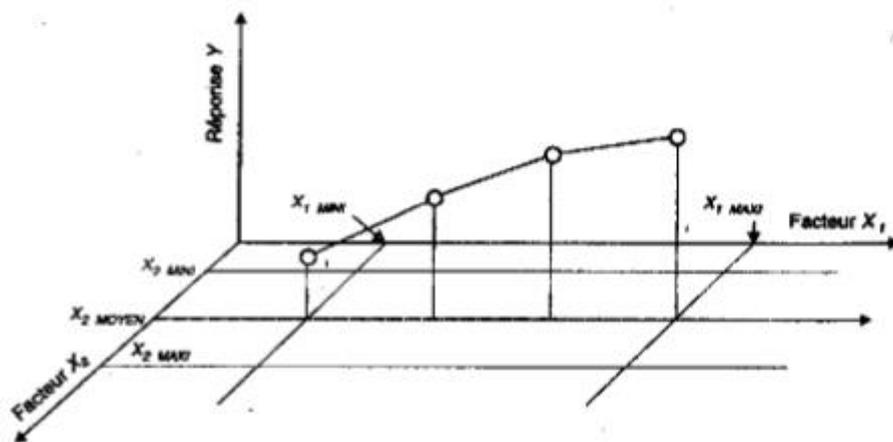


Figure 2.3 : méthode traditionnelle d'expérimentation et courbe de réponse [Pillet, 1992].

De manière intuitive, le formulateur étudie de façon séparée les deux facteurs (variables) X_1 et X_2 . Il fixe généralement X_2 à un niveau moyen et regarde l'évolution de la réponse quand X_1 varie de $X_{1\text{mini}}$ à $X_{1\text{maxi}}$ à l'aide des quatre essais présentés sur la **figure 2.4**. Il réalise ensuite le même type d'essais avec X_2 .

Un bon exemple est présenté sur la **figure 2.2** qui montre l'influence du rapport G/S sur l'affaissement pour un béton courant et un béton à haute performance. Le dosage en ciment ainsi que le rapport E/C ont été fixés et pour une étendue granulaire d/D donnée, le rapport G/S a été varié. Dans ce cas le formulateur obtient une réponse. Est-elle satisfaisante ? bien sur, elle apporte un enrichissement de la connaissance et nous donne la valeur G/S optimale pour chacun des deux bétons, en ce sens, l'expérience est bénéfique. Par ailleurs, elle peut laisser des points d'ombre : que se passe-t-il si l'un des paramètres initialement fixés varie ? Retrouvera-t-on les mêmes lois de variation ? Dans la pratique (**figure 2.4**), le formulateur réalise une expérience aux nœuds d'un maillage établi de façon empirique pour tracer ensuite des surfaces de réponse. Si le maillage est très serré, le nombre d'essais devient rapidement très grand. Généralement, un maillage serré traduit un manque de connaissance du phénomène étudié ou une crainte envers une réponse inattendue.

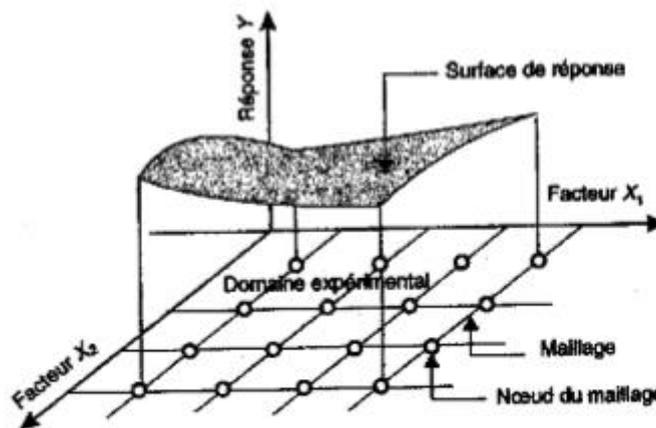


Figure 2.4: Maillage du domaine expérimental et surface de réponse [Pillet, 1992]

Pour améliorer la connaissance du phénomène observé, le formulateur réalise un maillage du domaine expérimental et exécute des essais à chacun des nœuds du maillage. Dans l'exemple (**figure 2.4**), il aura fallu seize essais pour tenter d'avoir une idée sur l'évolution de la réponse observée dans le domaine. Le principe de la méthode des plans d'expériences consiste à n'étudier sélectivement que quelques points du domaine, situés à sa frontière, aux points de

variation maximale des facteurs. Dans ce cas, quatre essais suffisent à établir un modèle avec interactions.

Faire un plan d'expériences, c'est planifier et structurer de manière systématique et rigoureuse l'ensemble des expériences d'un problème multiparamétrique. L'objectif essentiel d'un plan d'expériences est de réduire au minimum le nombre de mesures expérimentales par rapport à une approche classique, tout en assurant une qualité de résultats, et en obtenant une certaine capacité prédictive grâce à une modélisation mathématique.

Pour appliquer la méthode des plans d'expérience et, en particulier, les méthodes s'appuyant sur les régressions linéaires multiples, il faut que les deux conditions suivantes soient réalisées **[Baron et Ollivier, 1996]** :

- Les valeurs des facteurs (variables explicatives) sont connues sans erreur. Cette condition semble très restrictive : en effet, peut-on prétendre, dans la préparation d'une gâchée de béton, peser exactement la même quantité de ciment lorsqu'on répète un essai ? Bien évidemment, la réponse est négative. Mais, pour satisfaire cette condition N°1, on supposera que la variation du facteur autour d'un niveau fixé est très petite par rapport à la différence entre deux niveaux consécutifs et a, par conséquent, une incidence négligeable sur la réponse. Par exemple, une erreur de quelques dizaines de grammes (correspondant, généralement, à la précision des balances) sur la pesée du ciment pour une gâchée de laboratoire de quatre-vingt-dix litres, aura une influence négligeable sur les variations des résistances à la compression devant la variation du dosage en ciment lui-même, dont on cherche à analyser l'influence.
- La réponse (variable à expliquer) est homoscedastique. Cela signifie que l'aléa de mesure est constant sur l'ensemble du domaine étudié. Il est, en effet, difficile d'accorder une bonne confiance à un modèle établi sur des données dont la précision ne serait pas homogène. Pour résoudre ce problème, il existe (CETAMA (1986), Sanders et Allard, (1992)) cité dans la référence de **[Baron et Ollivier, 1996]** des tests de comparaison d'écart-types deux à deux (test de Fisher), ainsi que des tests de fusion de plusieurs écart-types (test de Bartlett). Dans tous les cas, si les écart-types ne sont pas significativement différents, on les fusionnera.

Il existe plusieurs types de plans d'expériences : les plans de mélange, les plans factoriels, les plans hybrides, les plans fractionnaires et les plans de Plackett et Burman. Nous nous contenterons dans ce qui suit, de donner quelques détails concernant les plans factoriels et les plans de mélange.

Un plan factoriel est un plan d'expériences comprenant k facteurs, chacun de ces facteurs possédant deux niveaux (un niveau inférieure (-1) et un niveau supérieur (+1)), d'où le terme 2^K . Pour k représentant trois facteurs, et, huit expériences sont à réaliser afin d'établir le modèle (**figure 2.5**) avec les interactions d'ordre 2 et l'interaction d'ordre 3. Le modèle recherché pour une réponse Y sera du type :

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_{12}X_1X_2 + A_{13}X_1X_3 + A_{23}X_2X_3 + A_{123}X_1X_2X_3 \quad (3.4)$$

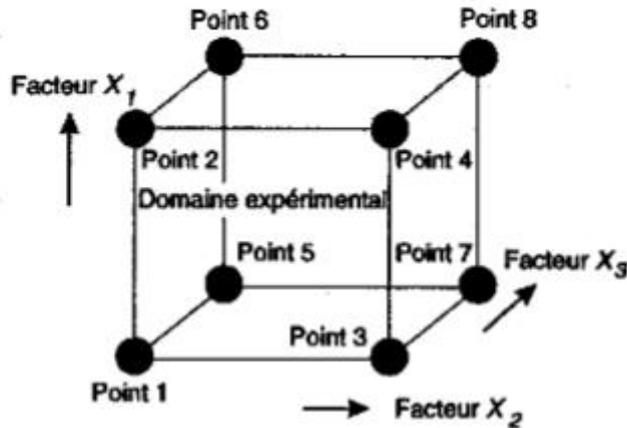


Figure 2.5 : Domaine expérimental d'un plan factoriel complet 2^3 [Sado et Sado, 1991]

Un plan de mélange est une forme particulière d'un plan factoriel complet. Les propriétés d'un mélange dépendent généralement de sa composition et il est fréquent que l'on veuille traduire les variations d'une propriété en fonction de la concentration des divers constituants [Sado et al. 1991]. C'est le cas du triangle de Féret (**figure 2.6**) dont on souhaite déterminer la compacité en tout point, caractérisée par les proportions du mélange qu'il représente.

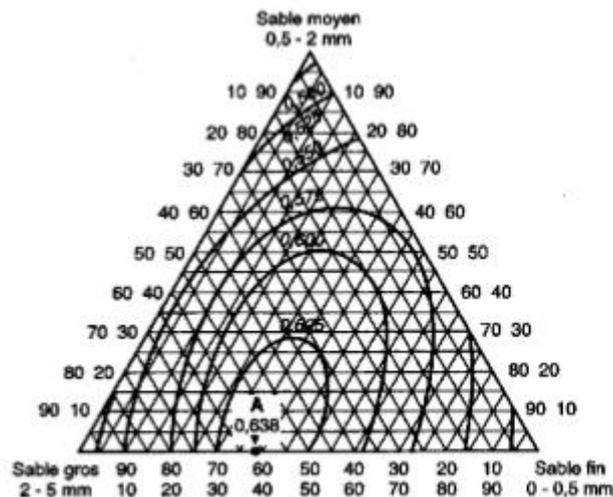


Figure 2.6 : Triangle de Féret, 1892 [Baron et Ollivier, 1996].

Les sommets du triangle représentent chacun des facteurs. Les courbes d'isocompacité sont représentées ici et la compacité maximale est obtenue en A.

Pour un plan de mélange à trois constituants, Le modèle recherché pour une réponse Y sera du type :

$$Y = BX_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3 + B_{123}X_1X_2X_3 \dots \dots \dots 3.5$$

Ce modèle comprenant trois facteurs avec interactions ne comporte que sept coefficients, donc il nécessite sept points expérimentaux distincts pour être entièrement déterminé (**figure 2.7**).

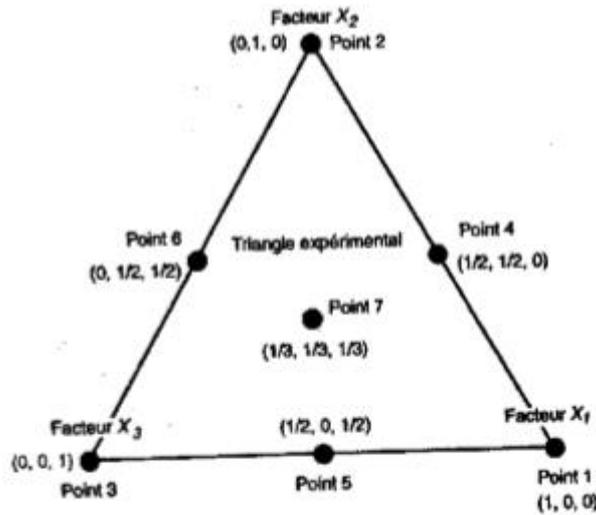


Figure 2.7 : Points expérimentaux pour un plan de mélange à trois constituants [Baron et Ollivier, 1996]

Les sept points expérimentaux sont situés sur la frontière du domaine sauf un, situé au centre de la section du triangle équilatéral. Il sert en particulier, à valider un modèle d'ordre 2 et à déterminer, dans un modèle d'ordre 3, l'interaction d'ordre 3 : B_{123}

L'organigramme général de traitement des plans d'expériences est présenté sur la **figure 2.8**.

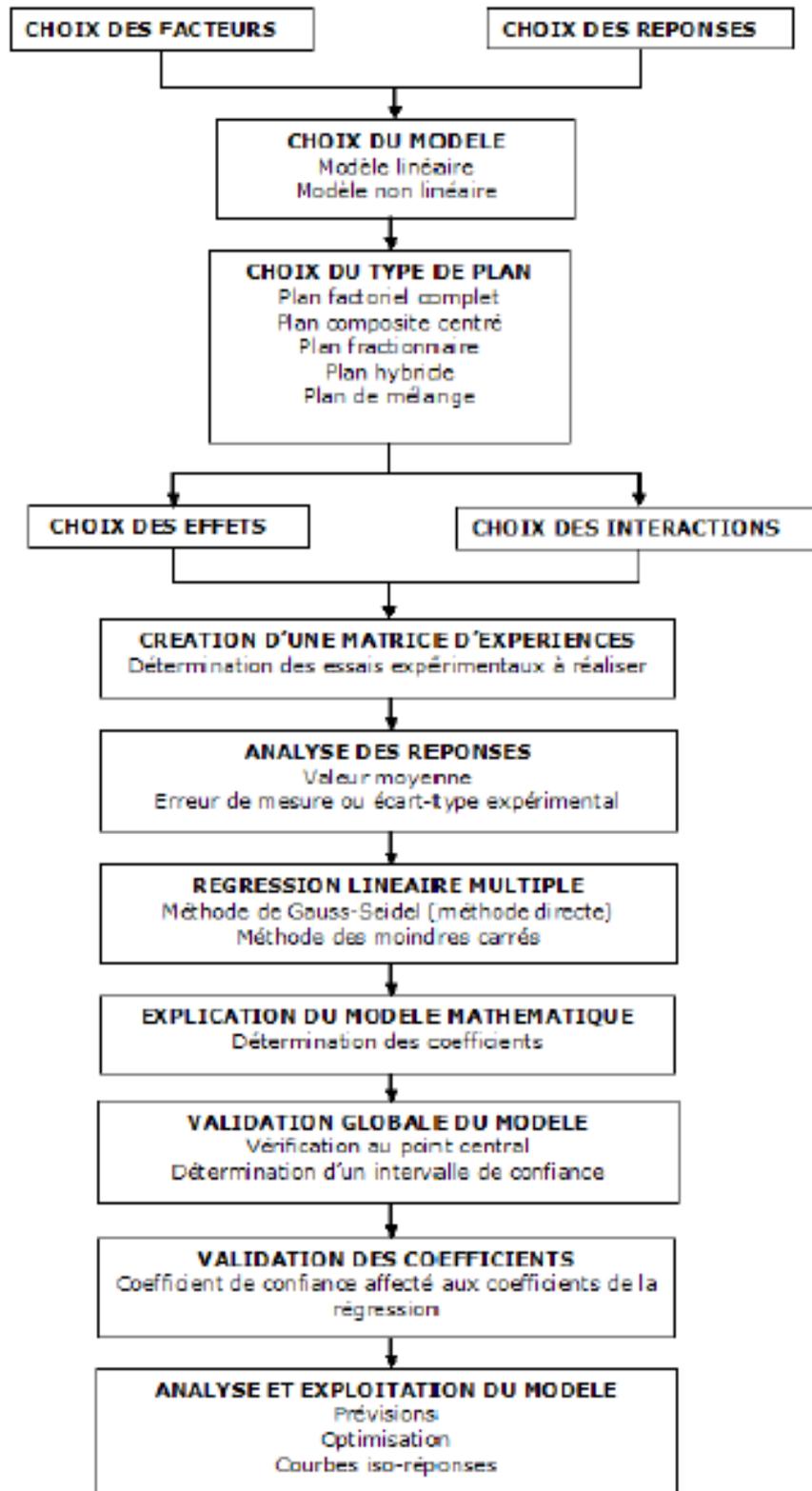


Figure 2.8 : Organigramme général de traitement des plans d'expériences [S.M.A. Boukli Hacene, 2010]

2.1.2.12 Méthode de Taguchi :

La méthode Taguchi, inventée par Gen'ichi Taguchi : né le 1^{er} janvier 1924 à Tōkamachi - mort le 2 juin 2012 à Tokyo est un ingénieur et statisticien japonais. Depuis les années 1950, il développe une méthode en vue d'utiliser la statistique comme outil pour améliorer la qualité des produits manufacturés.

Gen'ichi Taguchi a su démocratiser et rendre les plans d'expériences utilisables pour des techniciens. Cette méthode se concentre avant tout à minimiser les variations autour de la valeur de consigne. L'objectif est d'obtenir des produits, processus et systèmes aussi robustes et insensibles aux perturbations externes que possible. La méthode Taguchi est appliquée dans le cadre de l'amélioration de la qualité [Taguchi, 1950].

2.1.2.12.1 Le plan de taguchi (plan de taguchi orthogonal) :

Un plan de Taguchi est un plan d'expériences qui nous permet de choisir un produit ou un procédé qui fonctionne de manière plus cohérente dans un environnement d'exploitation. Les plans de Taguchi partent du principe que les facteurs à l'origine de la variabilité ne peuvent pas tous être contrôlés. Ces facteurs incontrôlables sont appelés facteurs de bruit. Les plans de Taguchi essaient d'identifier les facteurs contrôlables (facteurs de contrôle) qui minimisent l'effet des facteurs de bruit.

Pendant l'expérimentation, Il faut manipuler les facteurs de bruit de manière à imposer une variabilité, puis il faut déterminer les paramètres de facteurs de contrôle optimaux qui rendent le procédé ou le produit plus robuste ou plus résistant face à la variation provoquée par les facteurs de bruit. Un procédé conçu dans cette optique produira des résultats plus cohérents. Un produit conçu dans cette optique aura des performances plus cohérentes, quel que soit l'environnement dans lequel il sera utilisé.

Les plans de Taguchi utilisent des répertoires orthogonaux, qui évaluent les effets des facteurs sur la moyenne et sur la variation de la réponse. Avec un répertoire orthogonal, le plan est équilibré de telle sorte que les niveaux de facteurs sont également pondérés. Ainsi, chaque facteur peut être évalué indépendamment de tous les autres et l'effet d'un facteur n'influence pas l'estimation d'un autre facteur. Cela peut réduire la durée et le coût de l'expérience en cas d'utilisation de plans fractionnés.

Les plans de Taguchi orthogonaux se concentrent sur les effets principaux. Certains des applications sont intégrées dans le logiciel Minitab pour permettre d'étudier les interactions.

Minitab calcule les tableaux de réponses et les résultats du modèle linéaire, et génère des graphiques des effets principaux et des diagrammes des interactions.

Il est possible d'utiliser ces résultats et diagrammes pour déterminer les facteurs et les interactions qui sont importants et évaluer leur influence sur les réponses.

2.1.2.12.2 Comparaison des plans de Taguchi statiques et dynamiques :

Minitab propose deux types de plans de Taguchi qui permettent de choisir un produit ou un procédé qui fonctionne de manière plus cohérente dans un environnement d'exploitation. Ces deux plans tentent d'identifier les facteurs de contrôle qui limitent l'effet des facteurs de bruit sur le produit ou le service.

La réalisation d'un plan d'expériences de Taguchi par Minitab peut comporter les étapes suivantes :

1. Sélectionner les facteurs de contrôle et les facteurs de bruit. Les facteurs de contrôle servent à optimiser le procédé. Les facteurs de bruit peuvent agir sur les performances d'un système. Minitab permet de concevoir un plan de Taguchi.

Les facteurs de bruit également être soigneusement sélectionnés, voire faire l'objet d'expériences préliminaires. Les niveaux de bruit sélectionnés doivent représenter un large éventail de conditions dans lesquelles la variable de réponse doit demeurer robuste. Les facteurs de bruit doivent être contrôlés pour l'expérimentation.

2. Sélectionner Stat > DOE (plan d'expériences) > Taguchi > Créer un plan de Taguchi pour générer un plan de Taguchi (plan de Taguchi orthogonal). Chaque colonne du répertoire orthogonal représente un facteur particulier, avec au moins deux niveaux. Chaque ligne représente un essai ; les valeurs dans les cellules identifient les paramètres des facteurs pour l'essai. Par défaut, les plans orthogonaux de Minitab utilisent les nombres entiers 1, 2, 3 pour représenter les niveaux des facteurs. Si on fait entrer les niveaux de facteurs, les nombres entiers 1, 2, 3 sont les niveaux codés pour le plan.

On utilise la commande Stat > DOE (plan d'expériences) > Taguchi > on définit un plan de Taguchi personnalisé pour créer un plan à partir de données figurant déjà dans la feuille de travail. L'option « Définir un plan de Taguchi » personnalisé nous permet de spécifier nos

colonnes de facteurs et de facteurs de signal. Nous pouvons alors aisément analyser le plan et générer des diagrammes.

3. Une fois le plan créé, on utilise Stat > DOE (plan d'expériences) > on modifie le plan pour renommer les facteurs, on modifie les niveaux des facteurs, on ajoute un facteur de signal à un plan statique, on ignore un facteur de signal existant (traiter le plan comme statique) et on ajoute des niveaux supplémentaires à un facteur de signal existant.

4. Une fois le plan créé, on utilise la commande Stat > DOE (plan d'expériences) > on affiche le plan pour modifier les unités (codées ou non codées) dans lesquelles Minitab exprime les facteurs dans la feuille de travail.

5. Une expérience est effectuée en essayant la totalité des paramètres des facteurs de bruit pour chaque combinaison des paramètres de facteurs de contrôle (à chaque essai). Les données de réponse de chaque essai des facteurs de bruit dans le répertoire extérieur sont généralement contenues dans une ligne, à côté des paramètres des facteurs de contrôle dans le répertoire intérieur pour cet essai.

6. On utilise la commande Stat > DOE (plan d'expériences) > Taguchi > on analyse un plan de Taguchi pour analyser les données de l'expérience.

Analysant chaque variable de réponse séparément avec les plans de Taguchi. Bien que l'analyse de Taguchi accepte les colonnes à réponses multiples, ces réponses doivent correspondre à la même variable mesurée dans des conditions de facteur de bruit différentes.

7. On utilise la commande Stat > DOE (plan d'expériences) > Taguchi > on prévoit les résultats de Taguchi pour prévoir les rapports signal/bruit et les caractéristiques des réponses des nouveaux paramètres de facteurs sélectionnés.

2.2 Conclusion :

A l'issue de cette synthèse bibliographique, il est clair que plusieurs démarches peuvent être utilisées pour la formulation des bétons ordinaires. Toutefois, certaines restent plus recommandées comme la méthode de Dreux Gorisse qui permet de prendre en considération les caractéristiques intrinsèques des constituants. D'autres méthodes sont aussi intéressantes comme la méthode basée sur l'analyse statistique car elles permettent de développer des modèles prédictives qui peuvent ensuite être facilement exploités dans le secteur socioprofessionnel.

CHAPITRE 3

CARACTERISATION DES MATERIAUX

3.1 Introduction :

Toutes les études de formulation des bétons sont basées sur la connaissance des différentes caractéristiques de tous les composants du mélange en vue de lui offrir les meilleures performances

Les matériaux utilisés dans ce travail se trouvent dans notre région (Tlemcen). Le ciment utilisé est un CPJ – CEM II/A 42.5 en provenance de la cimenterie de Béni –Saf (Wilaya d'Aïn Temouchent).

3.2 Caractéristiques physico-chimiques du ciment :

3.2.1 Composition chimique et minéralogique :

Les caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment utilisé sont mentionnées dans les tableaux ci-dessous (3.1 et 3.2).

Tableau 3.1 : composition chimique du ciment

caractéristiques	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	Perte au feu	Insolubles
Teneurs [%]	22.76	63.43	0.21	3.57	5.96	1.91	2.37	2.16

Tableau 3.2 : Composition de Bogue minéralogique du ciment.

Minéraux	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneurs [%]	39.86	35.20	9.75	10.86

3.2.2 Caractéristiques physico- mécaniques :

3.2.2.1 Masses volumiques (apparente et absolue) :

Les masses volumiques (apparente et absolue) ont été déterminées conformément à la norme **NF P 18-558**. Nous avons utilisé deux méthodes pour le calcul de la masse volumique absolue, la méthode du densitomètre Le Chatelier ainsi que celle du pycnomètre à liquide. Les résultats des trois essais sont mentionnés dans **le tableau 3.3**.

3.2.2.2 Essai de consistance :

L'objectif de cet essai est de déterminer, pour le ciment CEM II/A 42.5 que nous avons utilisé, la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la consistance désirée. Cette dernière a été mesurée par l'appareil Vicat conformément aux perspectives de la norme **NF EN 196-3**.

Les résultats concernant la consistance sont mentionnés dans **tableau 3.3**.

3.2.2.3 Essai de prise :

L'objectif de cet essai est de déterminer le temps de prise d'un matériau finement moulu le ciment. Le temps de prise du ciment est déterminé par l'essai de l'aiguille Vicat qui est pénétrée dans une pâte de ciment de consistance normalisée **NF EN 196-3**. Cette appareil permet d'estimer le temps qui sépare la mise en contact du ciment et de l'eau, le début de prise (enfoncement de l'aiguille Vicat jusqu'à 4 mm du fond) et la fin de prise (enfoncement quasi nul).

Le temps de début de prise Vicat est indiqué sur le **tableau 3.3**.

Tableau 3.3 : caractéristiques physico- mécaniques du ciment.

Masse volumique apparente (kg/m^3)	942
Masse volumique absolue (densitomètre Le Chatelier) (kg/m^3)	2983
Masse volumique absolue (pycnomètre à liquide) (kg/m^3)	2988
Consistance (%)	28,20
Début de prise	145

3.2.3 Interprétation des résultats :

Les masses volumiques (apparente et absolue) du ciment utilisé, sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme **NA 231 [Normes Algériennes, 1992]**, compris entre 900 -1100 kg/m^3 pour la masse volumique apparente et 2900 – 3150 kg/m^3 pour la masse volumique absolue.

La consistance obtenue est conforme à la norme **NF EN 196-3** où les valeurs sont généralement comprises entre 26 et 33%. De même, un temps de prise minimal de 60 minutes est prescrit par la norme NF P 15-301 pour les ciments de classe 42,5.

3.2.4 Agrégats (sable et graviers) :

Les granulats utilisés proviennent d'une grande carrière de la région de Tlemcen, située à Sidi Abdelli, il s'agit de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) qui se situe à 28 km au Nord-est de la ville de Tlemcen sur la route nationale N°53 et à 4 km au sud de la localité de Sidi-Abdelli. Ce choix est dicté par le fait que cette carrière approvisionne principalement la région de part son importance en production.

Ces granulats concassés sont commercialisés en tant que classes granulaires : sable 0/4 et gravillons de classes 4/8, 8/16, 16/25.

3.2.4.1 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer la granularité (la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat). L'essai consiste à classer à l'aide de tamis les différents grains qui constituent l'échantillon selon leur diamètre. Pour cela en utilisant une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé dans le tamis supérieur et le classement des grains s'obtient par vibration de l'ensemble de la colonne des tamis à l'aide d'une machine à tamiser électrique qui imprime un mouvement vibratoire (**figure 3.1**)



Figure 3.1 : Tamiseuse électrique.

Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. La représentation graphique de l'analyse permet d'observer et d'exploiter ces informations très simplement. Dans notre cas on a utilisé la procédure de tamisage par voie sèche qui est conforme à la norme **NA 2607**, pour les deux matériaux : sable et gravier.

Les résultats de l'analyse granulométrique établie pour chaque fraction sont présentés dans **les Tableaux 3.4, 3.7, 3.8 et 3.9**

Les échantillons ont été préparés suivant les prescriptions de la norme **NA 453** et les analyses granulométriques faites conformément à la norme **EN 933-2**.

- **Le sable :**

Le sable est un granulat calcaire concassé est commercialisé en tant que classe granulaire 0/4.

Tableau 3.4 : Analyse granulométrique du sable.

Sable 0/4				
La masse sèche de sable = 1kg \geq 0.2 D (D en mm)				
Ouverture du tamis (mm)	Masse des refus (kg)	Masse des refus cumulés (kg)	Pourcentages des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés (%)
6.3	0	0	0	100
5	0.007	0.007	0.7	99.3
4	0.036	0.043	4.3	95.7
2.5	0.234	0.277	27.7	72.3
1.25	0.126	0.403	40.3	59.7
0.63	0.108	0.511	51.1	48.9
0.315	0.164	0.675	67.5	32.5
0.16	0.078	0.753	75.3	24.7
0.125	0.056	0.809	80.9	19.1
0.1	0.001	0.81	81	19
0.08	0.024	0.834	83.4	16.6
Fond	0.166	1	100	0

❖ **Module de finesse du sable « *Mf* »**

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse

« *Mf* ». La norme **XP P 18-540** définit le module de finesse d'un sable qui caractérise sa granularité comme le 1/100 émet de la somme des refus, exprimés en pourcentages, sur les différents tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5,0 mm, et est déterminée par la formule suivante :

$$Mf = \frac{1}{100} \sum \% Rc \{0.16; 0.315; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5\} \dots\dots\dots (3.1)$$

Mf: module de finesse = (1/100) x 262,6 = 2,63

Le tableau 3.5 : indique les spécifications techniques pour les sables

Tableau 3.5 : Spécification techniques pour les sables.

Granulat	Sable 0/4	Spécifications
Module de finesse	2.5	2.8 < <i>Mf</i> < 3.2 : sable grossier 2.2 < <i>Mf</i> < 2.8 : sable moyen 1.8 < <i>Mf</i> < 2.2 : sable fin

Pour un sable, plus le module de finesse est faible, plus le sable est riche en éléments fins ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau, et plus le module de finesse est élevé, le sable manque de fines et le béton perd en ouvrabilité.

Le sable utilisé est conforme aux exigences de la norme **P 18-541** qui fixe un module de finesse compris entre 1,8 à 3,2. De plus son module de finesse de 2,63 est recommandé pour des bétons de bonnes qualités.

❖ **Pourcentage des fines**

Pour déterminer le pourcentage des fines on pèse 1Kg de sable (*M1*), puis on le lave avec de l'eau dans le tamis de 80 µm (tamisage effectué sous l'eau) et on l'introduit dans l'étuve pendant 24h et ensuite il est pesé, la masse sèche obtenue est *M2* = 834 g.

$$\% \text{ des fines} = \frac{1000-834}{1000} \times 100 = 16.60 \%$$

D'après la norme **XP P 18 – 540**, la teneur en fines d'un granulat est définie par le passant à 0,08 mm. La norme indique la teneur maximale en fines dans les sables mesurée sur la fraction 0/4 mm en fonction de la catégorie des granulats :

Tableau 3.6 : Teneur en fines de la fraction 0/4 mm.

Catégorie	Passants (%) au tamis de 0.08 mm
A	≤ 12
B	≤ 15
C	≤ 18
D	Pas de spécifications

Le sable utilisé est composé de 16.60 % d'éléments fins qui vont participer à améliorer la rhéologie du béton. Toutefois, ces fines peuvent nécessiter une demande en eau plus élevée.

La **figure 3.2**. Montre aussi que le sable utilisé présente une granulométrie continue, ce qui est favorable pour améliorer la compacité du mélange.

Au vue de ces résultats, le sable pour les sables de catégories A et B, et exige un module optimum de 2,5. Le pourcentage en fines du sable est resté inférieur à 20%. Dans le cadre de notre étude, nous l'avons utilisé tel quel. Nous n'avons pratiqué aucun traitement (lavage) pour la réalisation des formulations de bétons préconisés.

- **Le gravier**

Les graviers de l'ENG sont disponibles sous forme des classes granulaires 4/8, 8/16 et 16/25.

Tableau 3.7 : Analyse granulométrique du gravier 4/8.

Gruvier 4/8				
La masse sèche du gruvier = 1.6 kg \geq 0.2 D (D en mm)				
Ouverture de tamis (mm)	Masse des refus (kg)	Masse des refus cumulés (kg)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés (%)
10	0	0	0	100
8	0.142	0.142	8.875	91.125
6.3	0.532	0.674	42.125	57.875
5	0.494	1.168	73	27
4	0.412	1.58	98.75	1.25
2.5	0.006	1.586	99.125	0.875
Fond	0.005	1.60	100	0

Tableau 3.8 : Analyse granulométrique du gravier 8/16.

Gavier 8/16				
La masse sèche du gravier = 2 kg \geq 0.2 D (D en mm)				
Ouverture de tamis (mm)	Masse des refus (kg)	Masse des refus cumulés (kg)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés (%)
20	0	0	0	100
16	0.09	0.09	4.5	95.5
12.5	0.898	0.988	49.4	50.6
10	0.749	1.737	86.85	13.15
8	0.220	1.957	97.85	2.15
6.3	0.038	1.995	99.75	0.25
5	0.004	1.999	99.95	0.05
Fond	0.001	2	100	0

Tableau 3.9 : Analyse granulométrique du gravier 16/25.

Gavier 16/25				
La masse sèche du gravier = 2 kg \geq 0.2 D (D en mm)				
Ouverture de tamis (mm)	Masse des refus (kg)	Masse des refus cumulés (kg)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamisats cumulés (%)
31.5	0	0	0	100
25	0.082	0.082	4.1	95.9
20	0.956	1.038	51.9	48.1
16	0.750	1.788	89.4	10.6
12.5	0.178	1.966	98.3	1.7
10	0.032	1.998	99.9	0.1
Fond	0.002	2	100	0

Les résultats des analyses granulométriques sont présentés sur **la figure 3.2**.

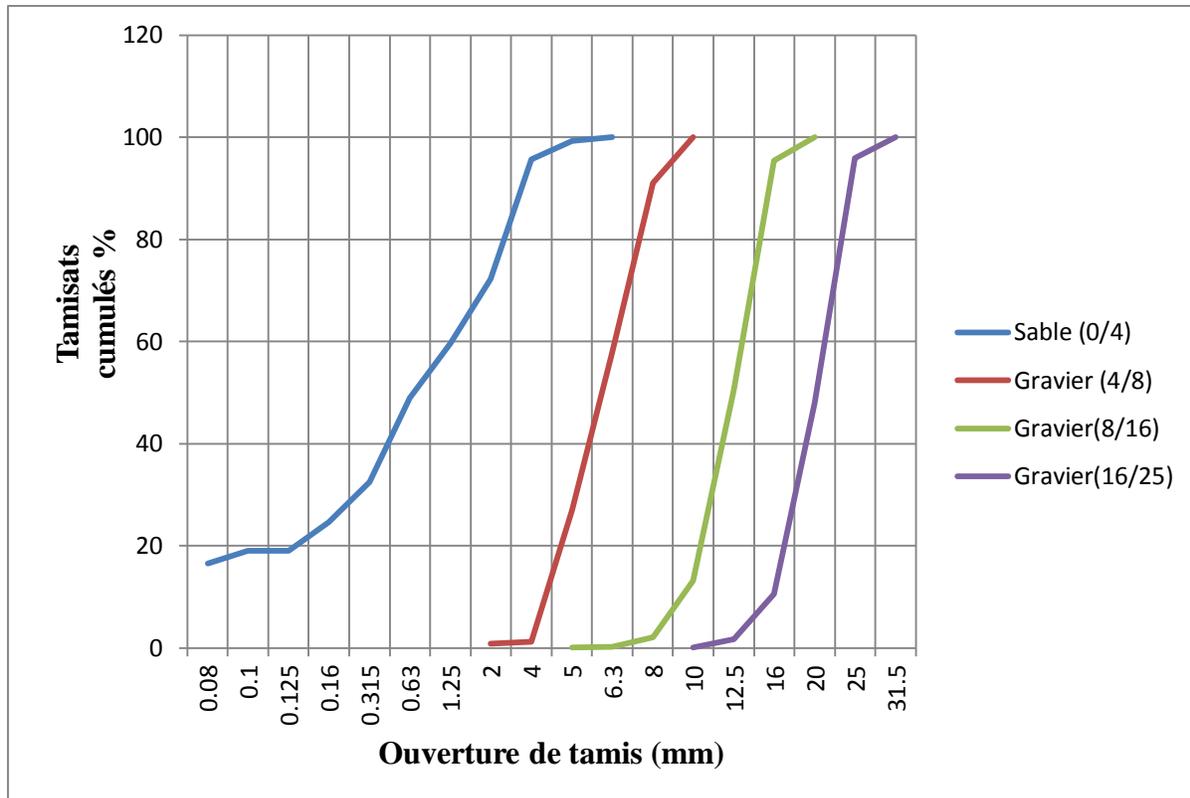


Figure 3.2 : Courbe granulométrique des granulates (ENG)

3.2.4.2 Propreté des granulates :

Les impuretés peuvent perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulates-pâte, ce qui peut avoir une incidence sur la résistance du béton. La propreté traduit l'absence d'éléments fins indésirables dans les granulates. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée.

L'essai de propreté des granulates consiste à déterminer le pourcentage d'éléments inférieurs à 0.5 mm conformément à la norme **NF P18-591**.

- **Essai d'équivalent de sable**

La détermination de la caractéristique « équivalent de sable » faite sur la fraction de granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm, permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans cette fraction en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile, impuretés...).

L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du floculat et de la partie sédimentée et ceci conformément à la norme **NFP 18-598**.

Les essais nous ont donné un équivalent de sable visuel de 75.01% et un équivalent de sable au piston de 71.22 % . La carrière de l'ENG produise donc un sable propre qui répond aux exigences de la norme **P 18-541** qui fixe les limites à $ESV \geq 65$ et $ESP \geq 60$ pour les sables concassés ou broyés. Les résultats de l'équivalent de sable sont récapitulés dans **les tableaux 3.10 et 3.11**.

Tableau 3.10 :L'équivalent de sable pour deux éprouvettes.

Echantillon de sable	Hauteur totale H1 (cm)	Hauteur totale H2 (cm)	ESV (visuel) $(H2/H1) \times 100$ (%)	Hauteur tassée au piston (H'2) (cm)	ESP (au piston) $(H'2/H1) \times 100$ (%)
Eprouvette 1	10.5	7.9	75.23	7.4	70.48
Eprouvette 2	10.7	8	74.77	7.7	71.96

3.2.5 Masses volumiques apparentes et absolues :

Nous avons déterminé les masses volumiques apparentes et absolues des graviers conformément à la norme **NA 255**. Pour la détermination de la masse volumique absolue des graviers, nous avons utilisé deux méthodes :

- Méthode de l'éprouvette graduée (simple et rapide, mais elle n'est pas très précise).
- Méthode du ballon (plus précis, mais plus délicat. Il n'y a plus de lectures de volumes, mais seulement des pesées).

Les graviers de la carrière présentent des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme **NF EN 12620**. La masse volumique apparente est comprise entre 1300 kg/m^3 et 1600 kg/m^3 et la masse volumique absolue est nettement plus élevée et est

comprise entre 2500 kg/m^3 et 2700 kg/m^3 . Les résultats des masses volumiques obtenus pour les différents graviers, sont récapitulés sur le **tableau 3.11**.

3.2.6 Foisonnement du sable :

L'importance du foisonnement dépend du pourcentage d'humidité présent dans le sable et de la finesse de celui-ci. L'augmentation de volume d'un sable humide, par rapport au volume occupé par un sable saturé et sec en surface, croît en fonction de l'humidité du sable jusqu'à un taux de 5 à 8 % [Neville, 2000]. Sous l'effet d'une addition d'eau, les films fusionnent et l'eau se déplace vers les vides entre les grains entraînant une diminution du volume total du sable jusqu'à ce que, complètement saturé, son volume soit approximativement le même que celui du sable sec obtenu avec la méthode de remplissage du récipient. **La figure 3.3** illustre ce qui précède.

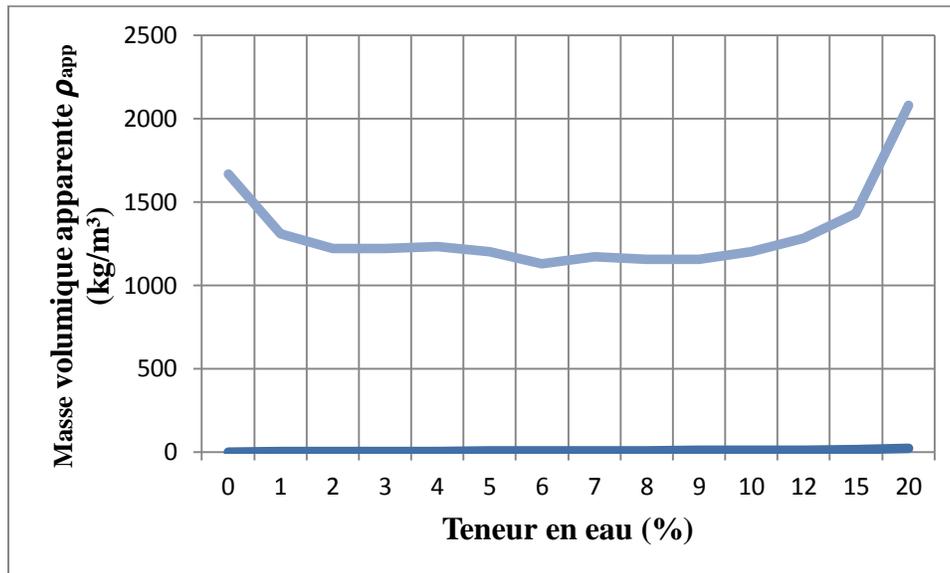


Figure 3. 3: Courbe de foisonnement du sable (carrière ENG)

Les résultats concernant les caractéristiques géométriques, physico-chimiques, physiques et mécaniques des granulats utilisés sont récapitulés dans le **tableau 3.11**.

Tableau 3.11 : Identification des propriétés des granulats de l'ENG.

Les caractéristiques des granulats	Classes granulaires			
	Sable (0/4)	Gravier (4/8)	Gravier (8/16)	Gravier (16/25)
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1436	1255	1257	1370
Masse volumique absolue (kg/m^3)	Mvé	2581	2296	2742
	Mvb	2660		
Equivalent de sable (%)	ESV = 75.01 ESP = 71.22	-	-	-
Foisonnement du sable	Wopt=7% lui correspond $\rho_{app} = 1163 \text{ kg/m}^3$			
Module de finesse	2.63	-	-	-
Teneur en fines (%)	16.60	-	-	-

Mvé : la masse volumique absolue (méthode de l'éprouvette graduée)

Mvb : la masse volumique absolue (méthode du ballon)

3.3 Caractérisation des bétons étudiés :

3.3.1 Caractérisation du béton à l'état frais :

Pour chaque formulation étudiée, nous avons caractérisé les paramètres suivants:

3.3.1.1 l'affaissement :

La mise en œuvre du béton frais pour l'essai d'affaissement au cône d'Abrams est effectuée d'après la norme Algérienne **NA 431**. La **figure 3.4** présente une photo de cet essai permettant d'avoir la consistance du béton.



Figure 3.4: Mesure de l'affaissement du béton au cône d'Abrams (Affaissement égal à 3,5 cm)

3.3.2 Confection des éprouvettes :

3.3.2.1 Remplissage des moules :

Les bétons réalisés ont été confectionnés conformément selon la norme en vigueur. Une fois le malaxage terminé, nous avons effectué l'essai d'affaissement. Par la suite, le béton a été mis dans des moules cylindriques 11x22 cm conformément à la norme **NA 2600**, au moyen d'une main écope. Pour chaque formulation, nous avons réalisé 5 éprouvettes.

3.3.2.2 Mise en place du béton

Le choix du mode de mise en place dépend de la consistance du béton mesurée par l'essai d'affaissement.

- lorsque l'affaissement mesuré est inférieur ou égale à 9, nous avons procédé à la mise en place du béton dans le moule cylindrique 11x22 cm en deux couches. Nous avons utilisé dans ce cas la table vibrante comme moyen de serrage, et ceci conformément à la norme **NF P 18-422**.

- lorsque l'affaissement mesuré est supérieur ou égale à 10, nous avons procédé à la mise en place du béton en deux couches d'égale importance par piquage à raison de 15 coups par couche, conformément à la norme **NF P 18-423**.

Enfin, nous procédons à l'arasement de la surface supérieure de l'éprouvette à l'aide d'une règle d'arasement, conformément à la norme **NF P 18-404**.

3.3.2.3 Conservation des éprouvettes :

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé un seul mode de conservation du béton. Les éprouvettes ont été totalement immergées dans l'eau à une température ambiante de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ (figure 3.5) conformément à la norme **NA 426**.



Figure 3.5 : Conservation des éprouvettes.

3.3.3 Caractérisation du béton à l'état durci :

La résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte du ciment hydraté. De plus, la résistance du béton avec les indicateurs de durabilité sont les éléments clés pour une durabilité des structures en béton.

A 14 jours, chaque éprouvette réalisée a été soumise aux essais suivants:

3.3.3.1 Essai de l'ultrason :

La mesure d'épaisseur par ultrasons est très largement utilisée et est souvent à tort considérée comme un contrôle basique de mise en œuvre triviale car se limitant à lire une valeur sur l'afficheur d'un petit appareil de mesure. En réalité comme toute opération de contrôle, elle est soumise à des facteurs d'influence très souvent sous-estimés voire inconnus des acteurs concernés.

Le principe de la mesure d'épaisseur par ultrasons, est basé sur la mesure d'un ou plusieurs temps de parcours d'une onde ultrasonore longitudinale dans l'épaisseur du matériau entre un signal pris comme référence et l'écho de fond se réfléchissant sur la paroi opposée au transducteur, conformément à la norme **EN 14127**.

L'épaisseur est calculée à l'aide de la formule ci-dessous :

$$R=0.342 \exp (1.004 V) \dots\dots\dots (3.2)$$

Où : R = résistance en ultrason (MPa) ;

V = vitesse des ondes ultrasoniques (m/s) ;

3.3.3.2 Essai de résistance à la compression :

L'essai pour la détermination de la résistance à la compression des éprouvettes, est exécuté conformément aux prescriptions de la norme **NA 427**. La contrainte de rupture est donnée directement par la machine d'essai (**figure 3.6**) avec une précision de 0.5 MPa.



Figure 3.6 : Machine d'essai de compression.

3.4 Conclusion :

Les résultats des essais montrent que le ciment est conforme aux exigences de sa classe. Ces masses volumiques sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme **NA 231** et sa consistance est conforme à la norme **NF EN 196-3**.

Les essais réalisés, sur les granulats de carrière choisie, ont présenté de bonnes propriétés physiques, physico- chimiques et mécaniques, qui répondent en général, aux spécifications exigées par la norme **P 18-541**. L'utilisation donc de ces granulats présentant de bonnes caractéristiques permettra l'obtention de bétons de qualité, satisfaisant les critères de maniabilité, de résistances et de durabilité.

CHAPITRE 4

APPROCHE PROCESSUS APPLIQUE A LA METHODE TAGUCHI

4.1 Introduction :

L'approche processus est un mode de management permettant de piloter les performances de tout organisme.

Le management par les processus est une des pierres angulaires de la norme ISO 9001.

Le résultat de l'identification des processus doit être clair, compris par un grand nombre d'acteurs et facilement partageable. Comme beaucoup de consultants et experts, nous suggérons une représentation graphique du résultat de l'identification des processus.

Et pour cela nous allons réaliser dans ce chapitre des processus de formulation des bétons à l'état frais ainsi que des processus des essais réalisés sur ces bétons à l'état durci.

4.2 Définition d'un processus :

C'est l'ensemble des ressources et des activités liées qui transforment des éléments entrants en éléments sortants. Toute tâche, toute activité qui génère un produit ou un service constitue un processus, ou un enchaînement de processus

Entrés : Éléments entrants ou produit, consommé par le processus, nécessaires à l'élaboration du produit, et sortant d'un processus amont

Sorties : Éléments sortants ou produits issus d'un processus.

Produits : Résultat d'activités ou de Processus inclus

- Les services
- Les matériels
- Les logiciels

4.3 Construction des processus de formulation du béton à l'état frais :

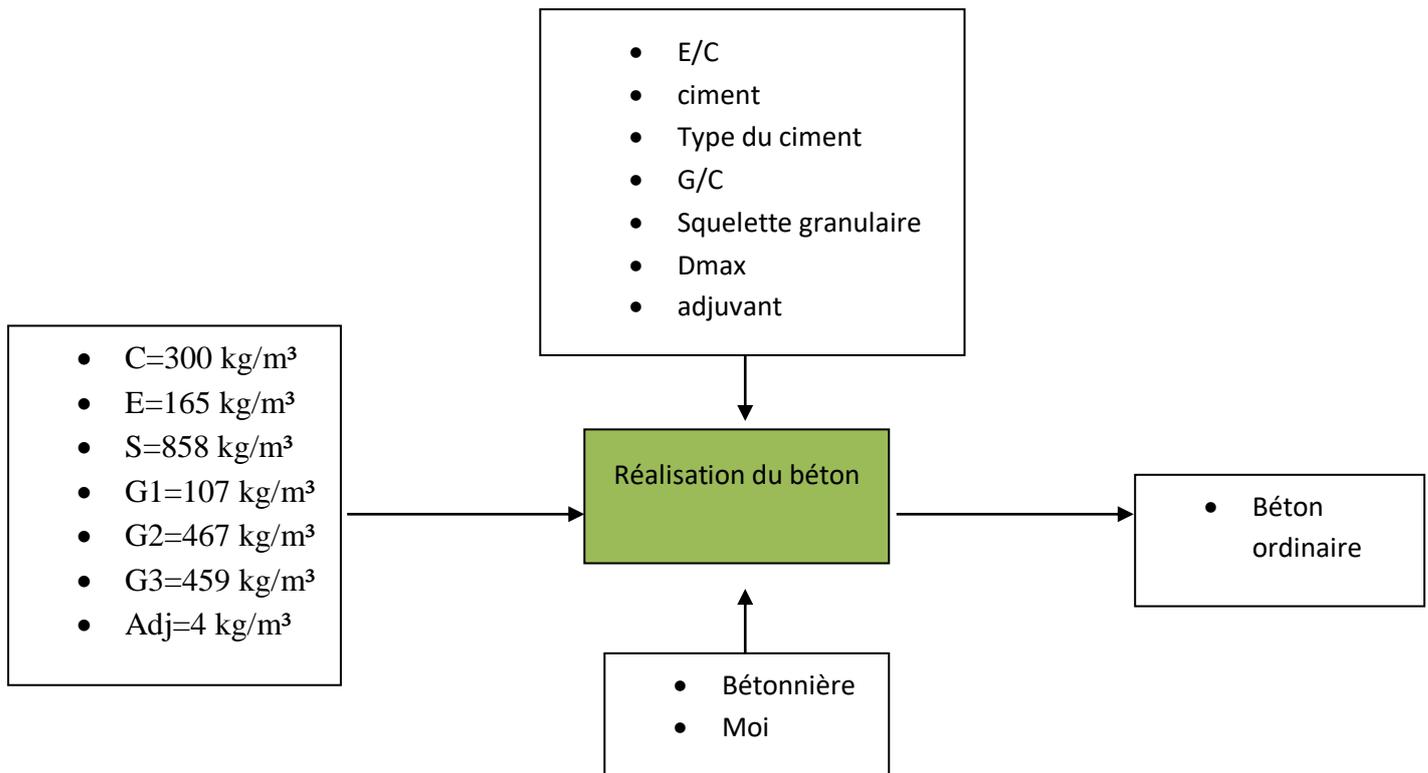


Figure 4.1 : processus de formulation 1 du béton ordinaire

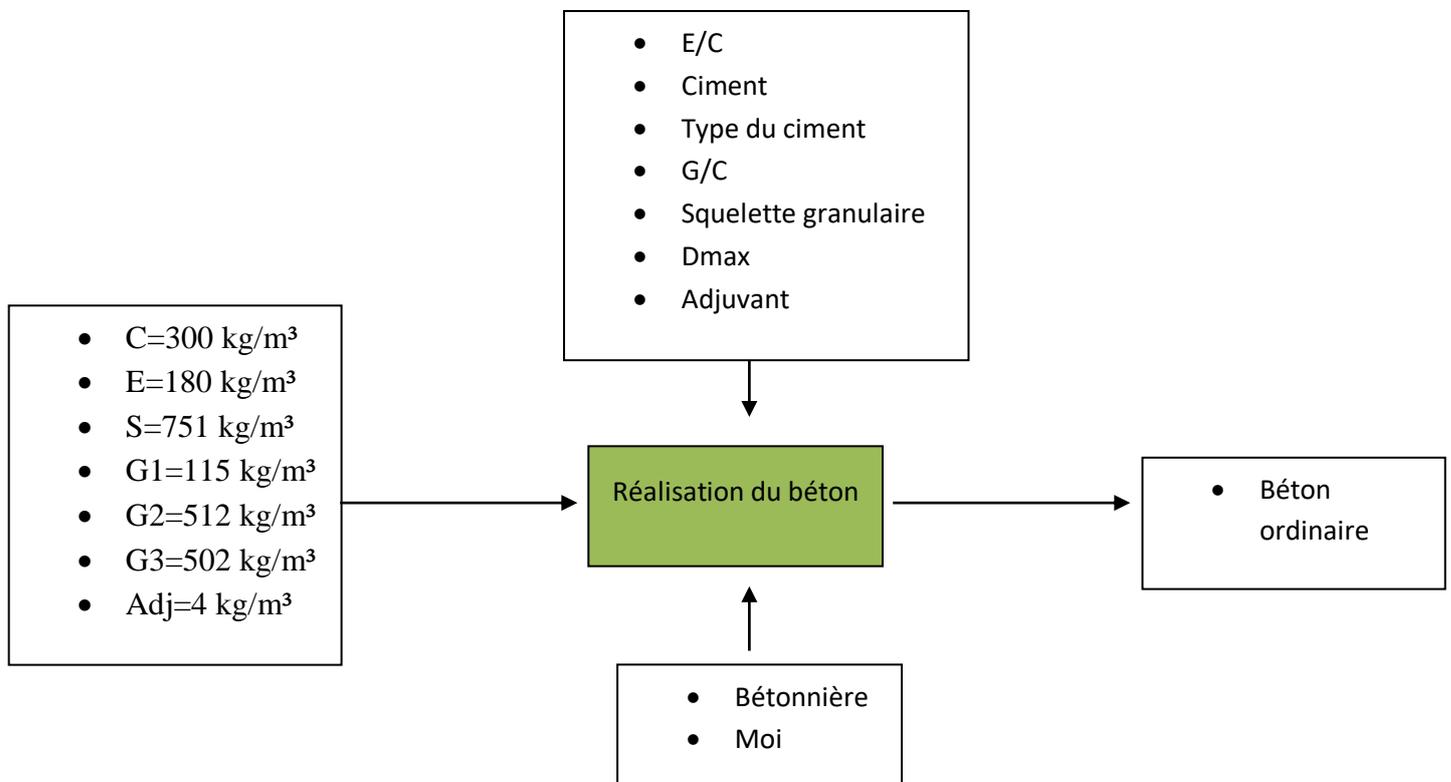


Figure 4.2 : processus de formulation 2 du béton ordinaire

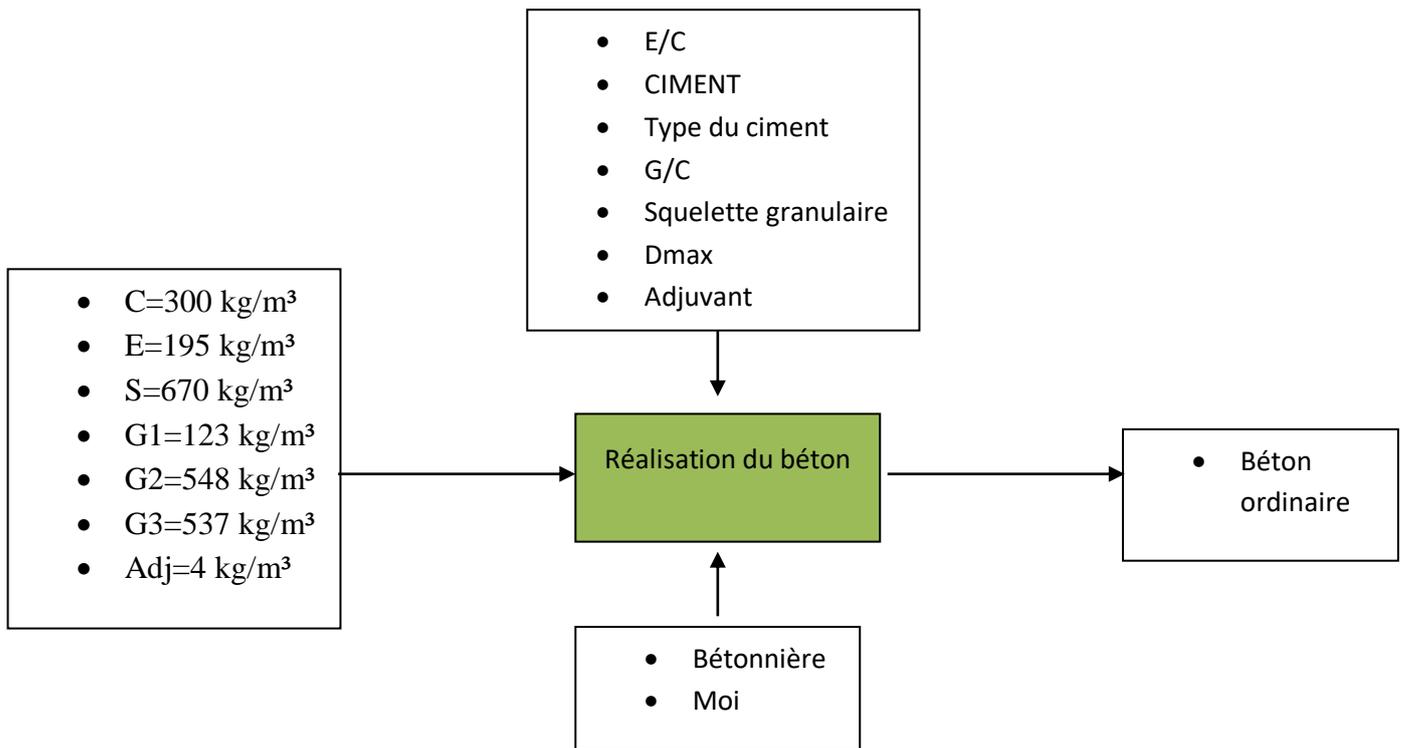


Figure 4.3 : processus de formulation 3 du béton ordinaire

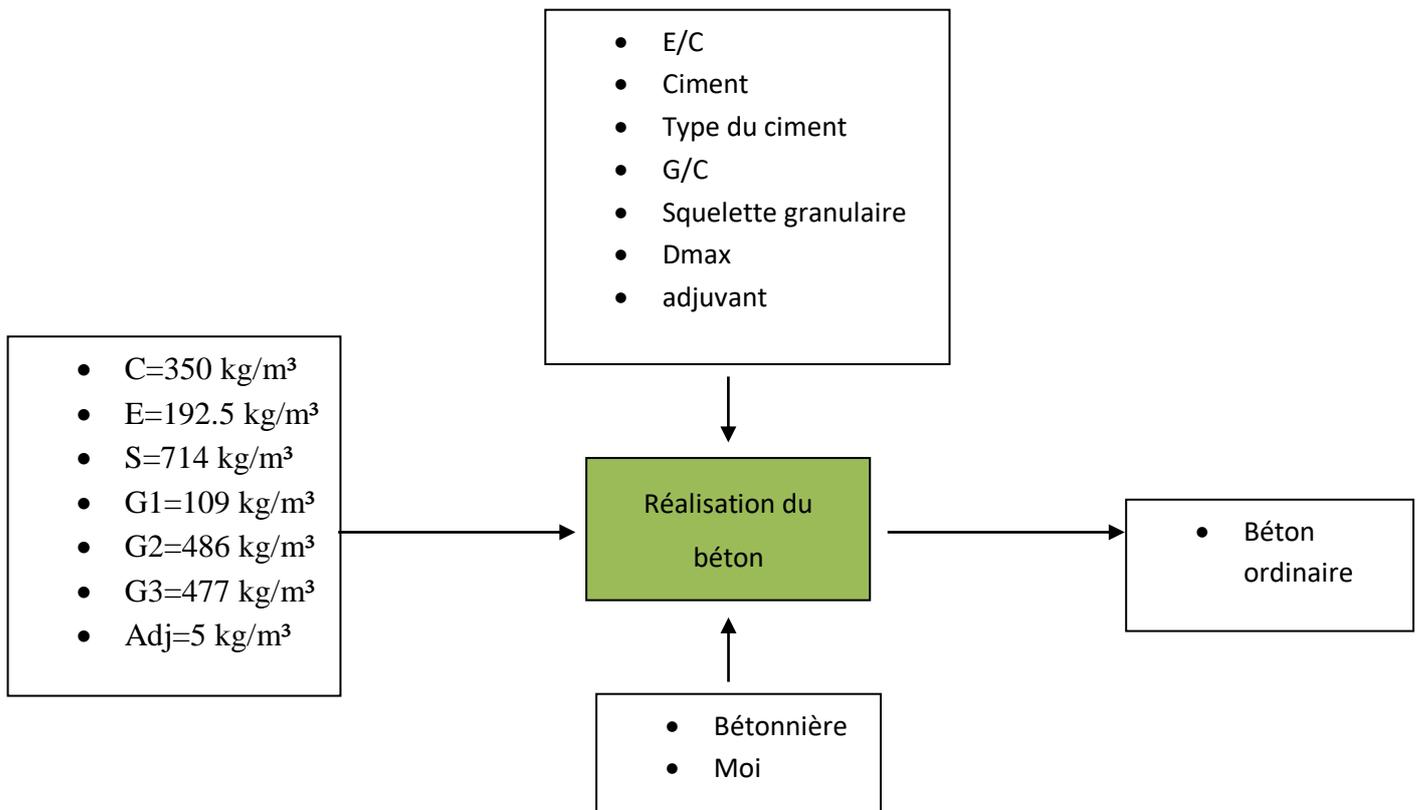


Figure 4.4 : processus de formulation 4 du béton ordinaire

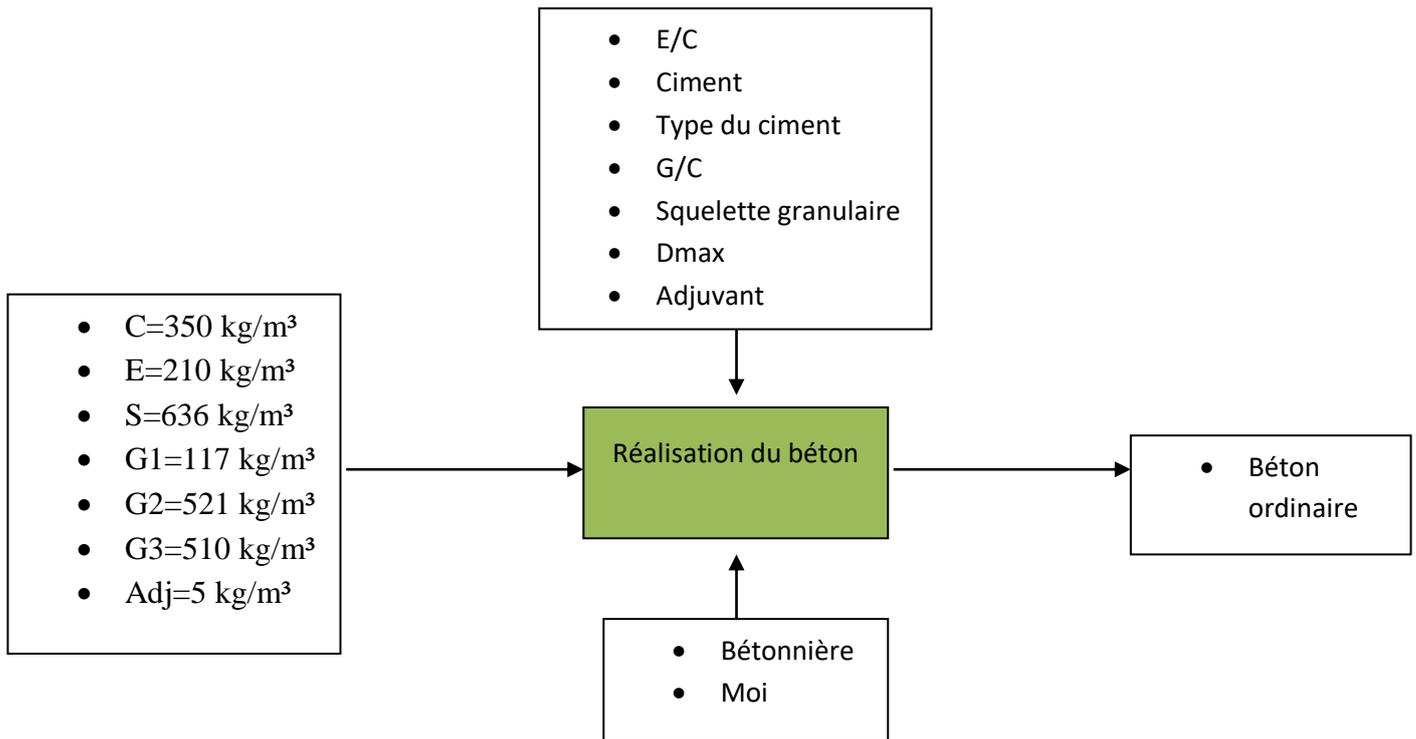


Figure 4.5 : processus de formulation 5 du béton ordinaire

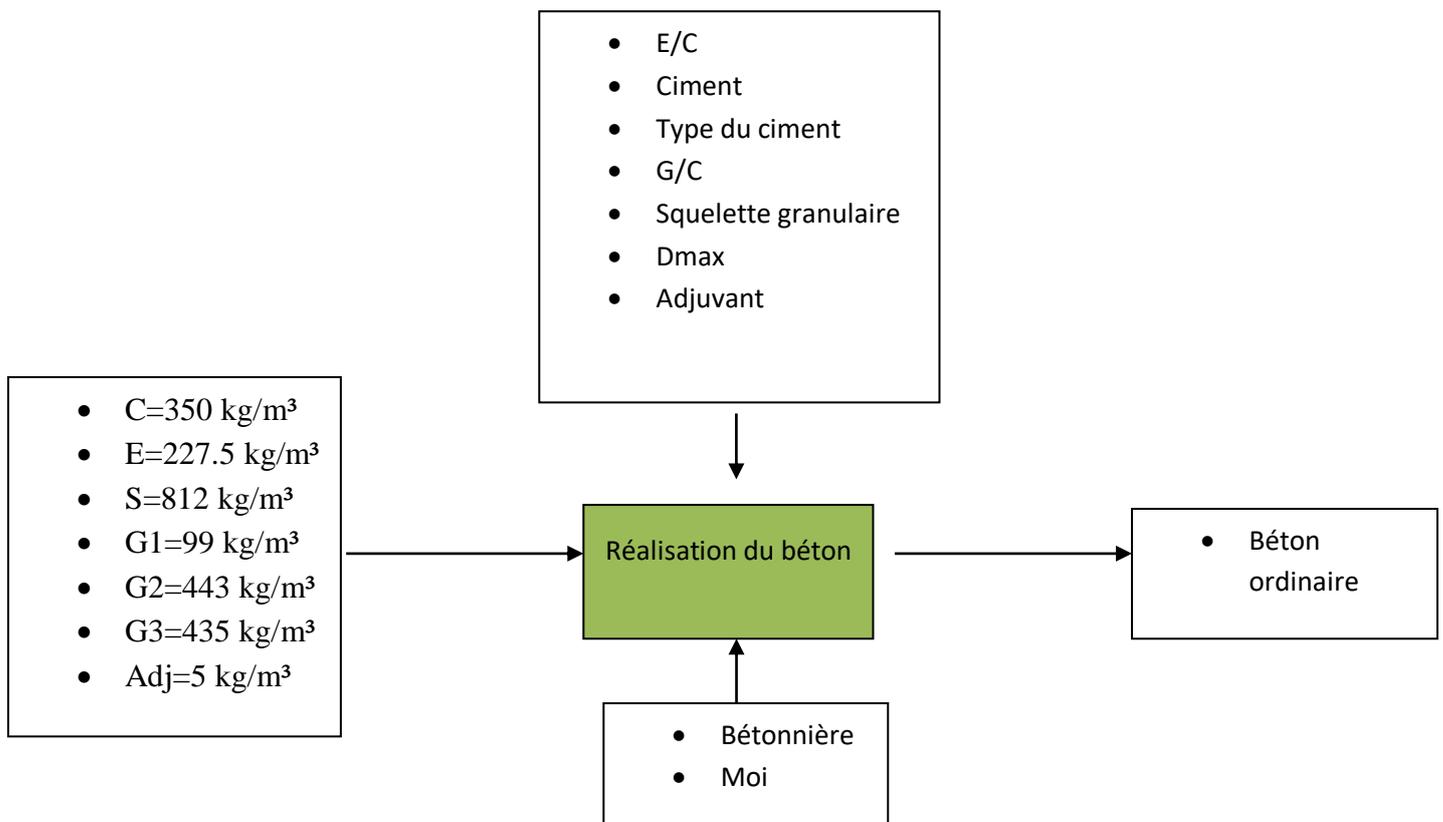


Figure 4.6 : processus de formulation 6 du béton ordinaire

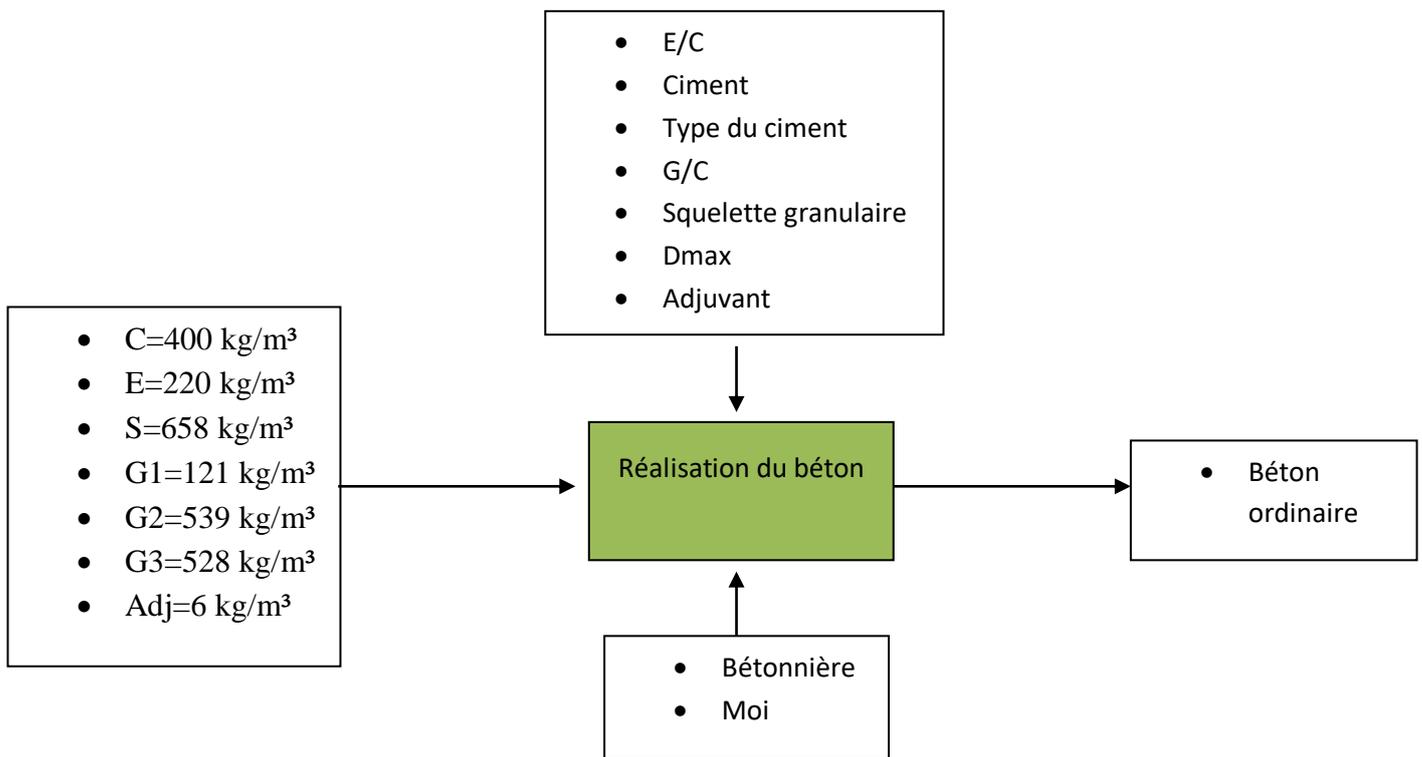


Figure 4.7 : processus de formulation 7 du béton ordinaire

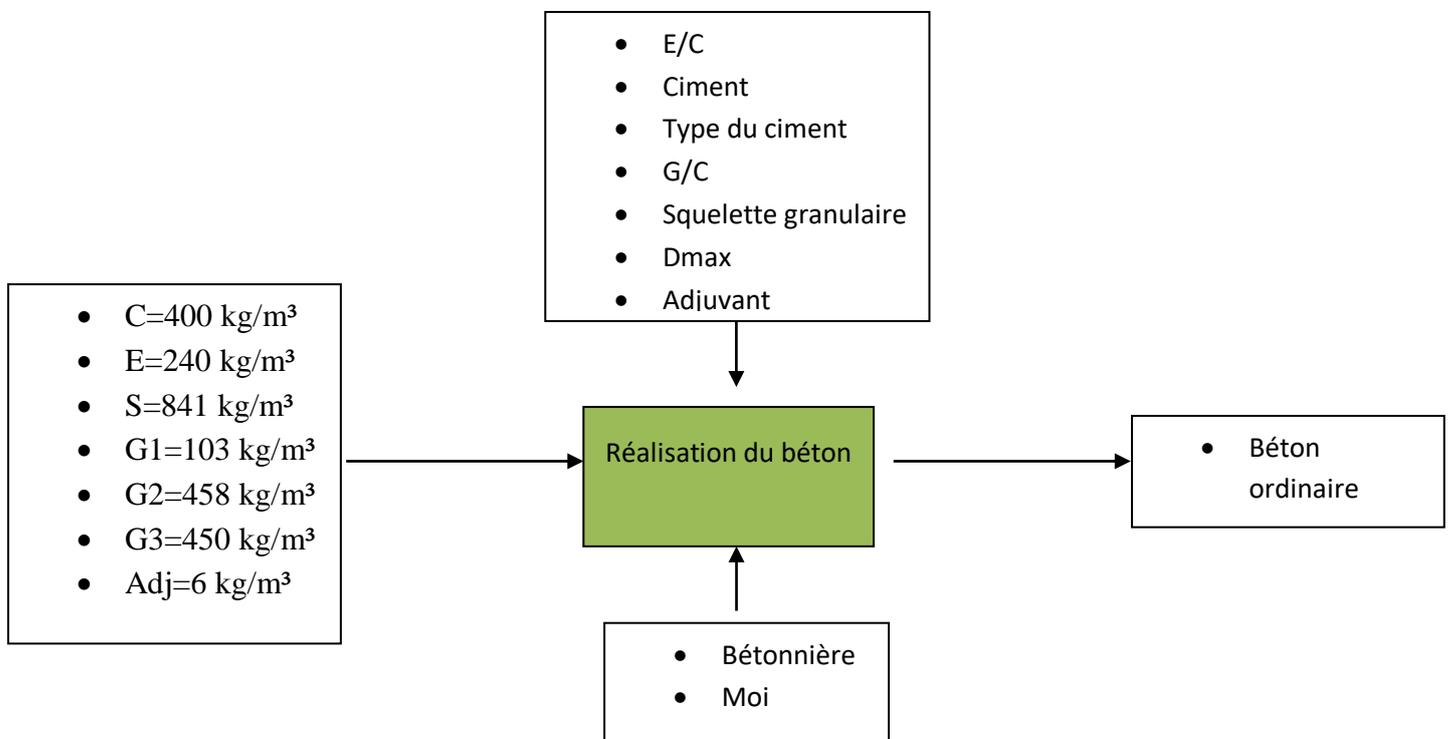


Figure 4.8 : processus de formulation 8 du béton ordinaire

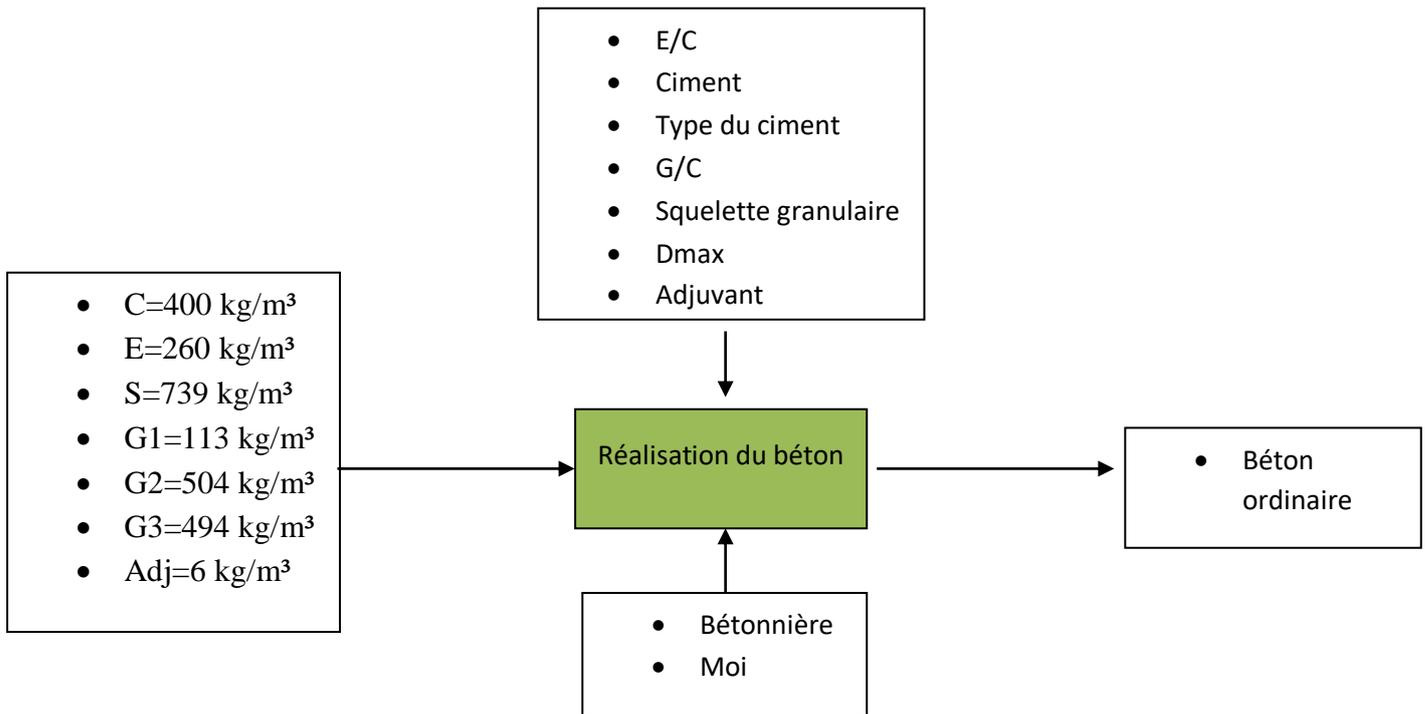


Figure 4.9 : processus de formulation 9 du béton ordinaire

4.4 Processus d'application des essais de compression sur le béton à l'état durci à 14 jours :

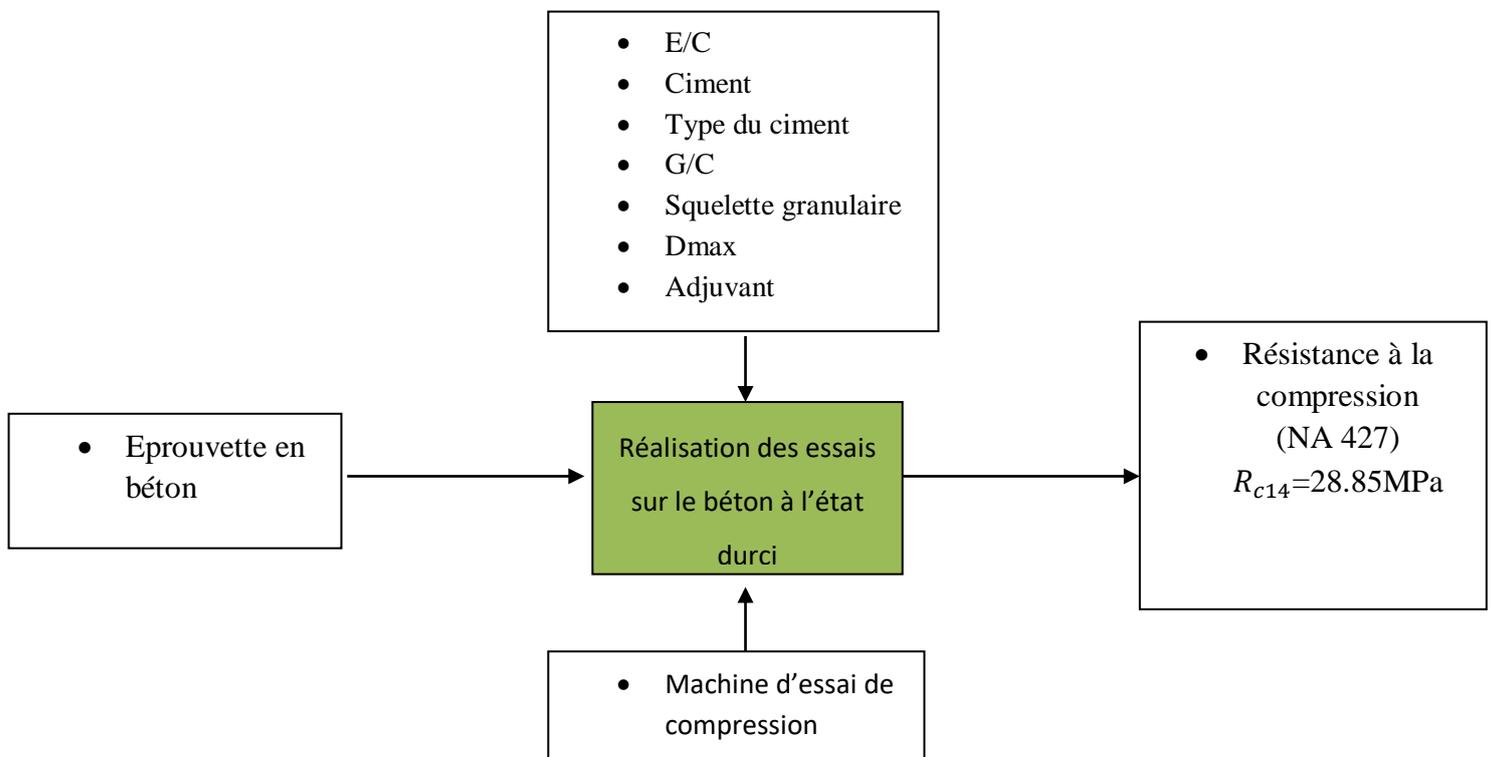


Figure 4.10 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la première formulation à l'état durci à 14 jours

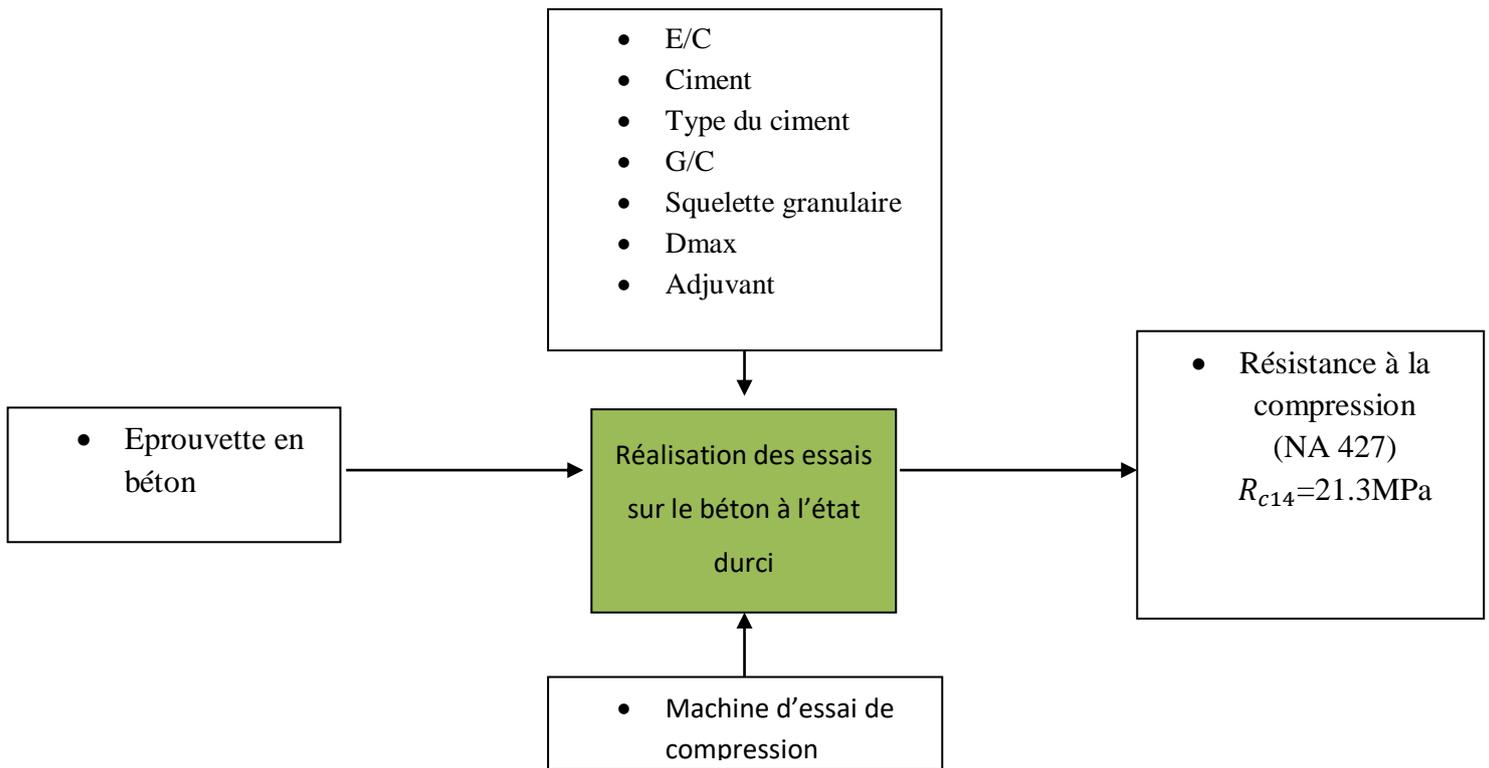


Figure 4.11 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la deuxième formulation à l'état durci à 14 jours

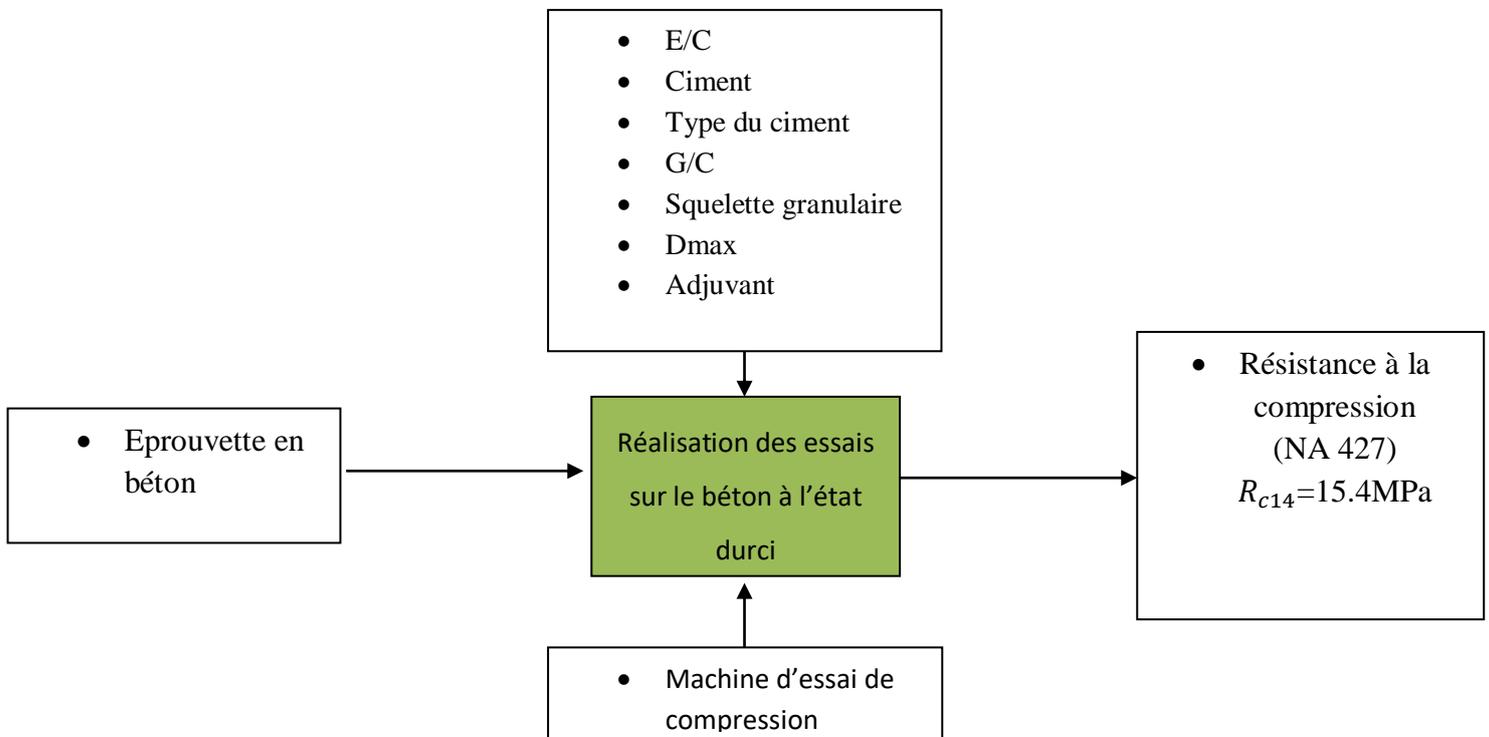


Figure 4.12 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la troisième formulation à l'état durci à 14 jours

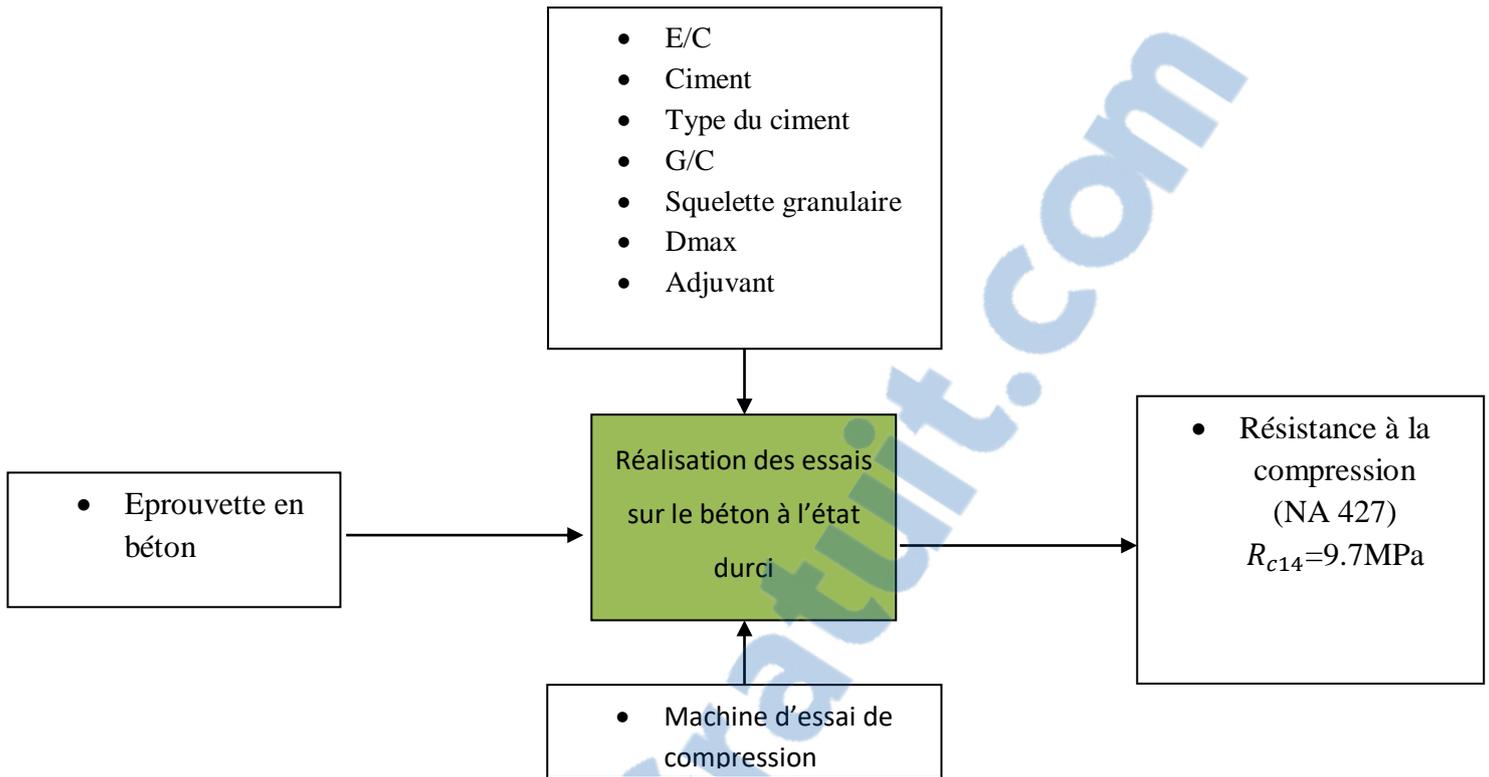


Figure 4.13 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la quatrième formulation à l'état durci à 14 jours

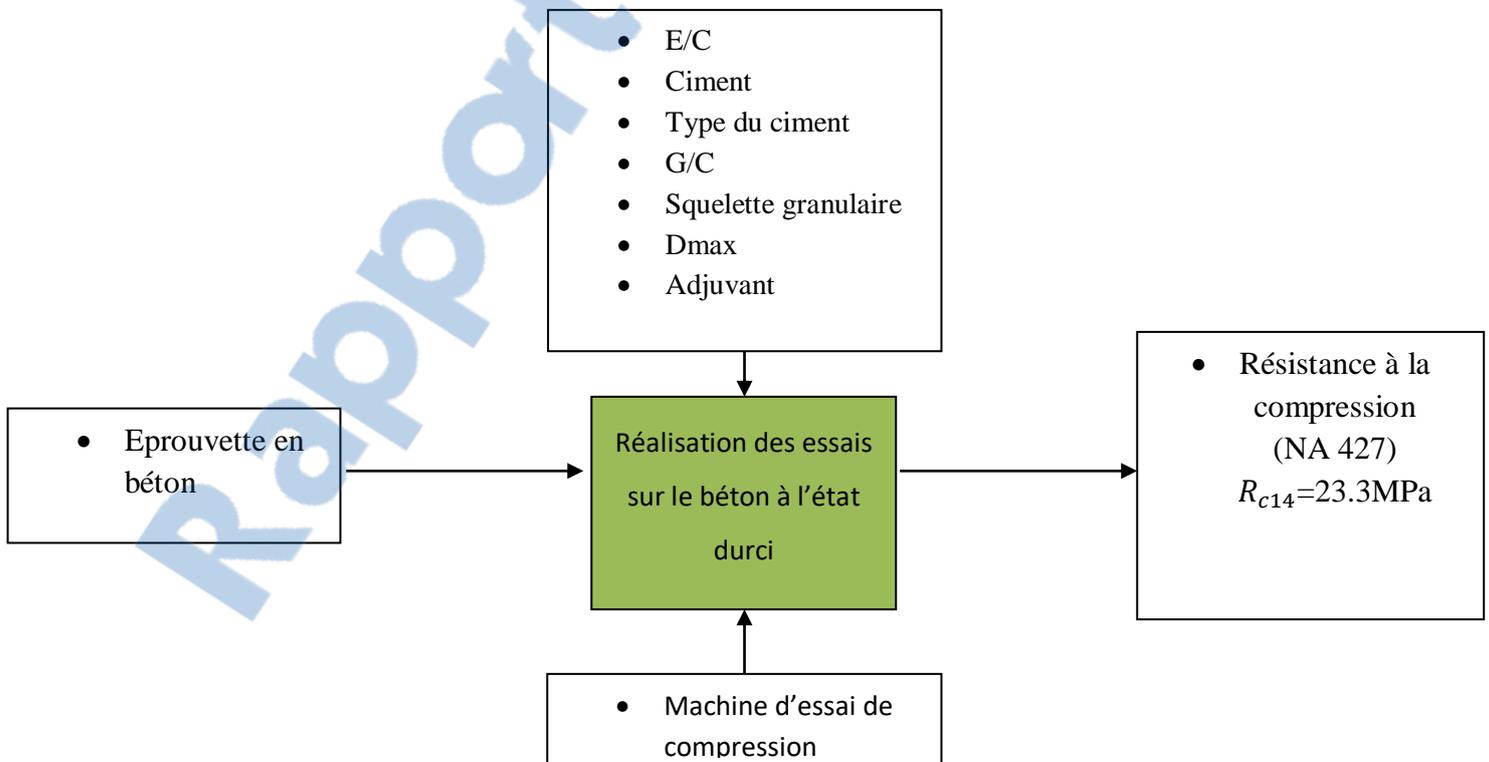


Figure 4.14 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la cinquième formulation à l'état durci à 14 jours

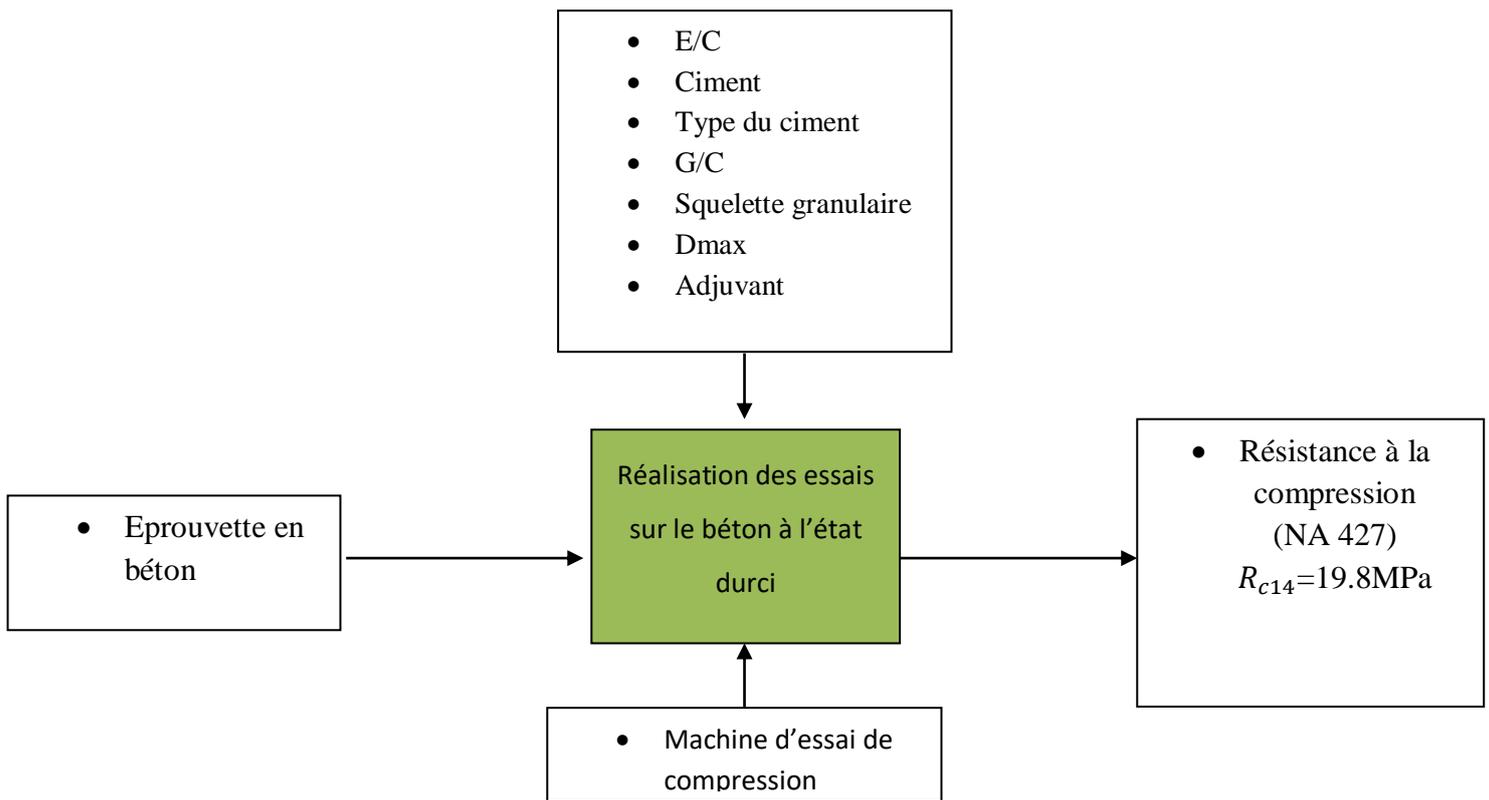


Figure 4.15 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la sixième formulation à l'état durci à 14 jours

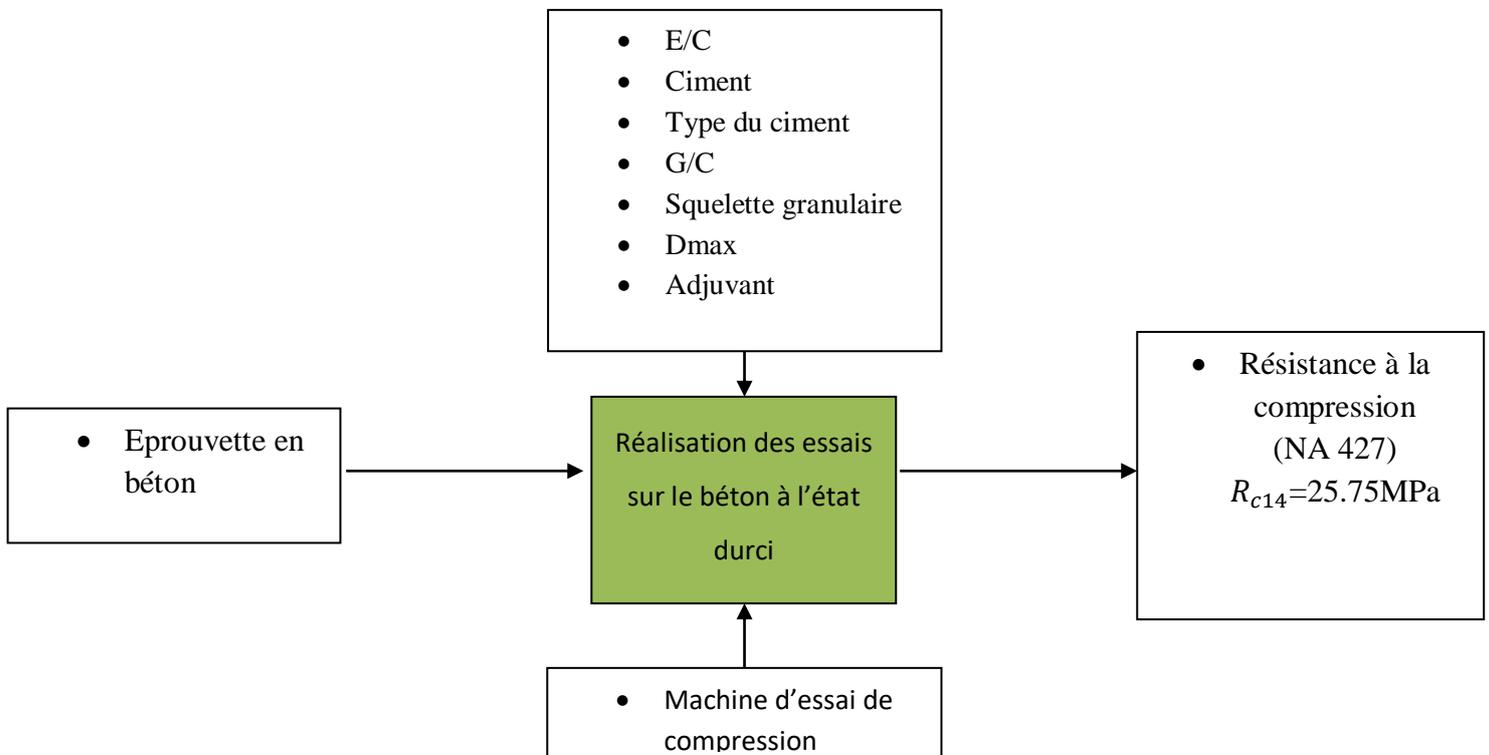


Figure 4.16 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la septième formulation à l'état durci à 14 jours

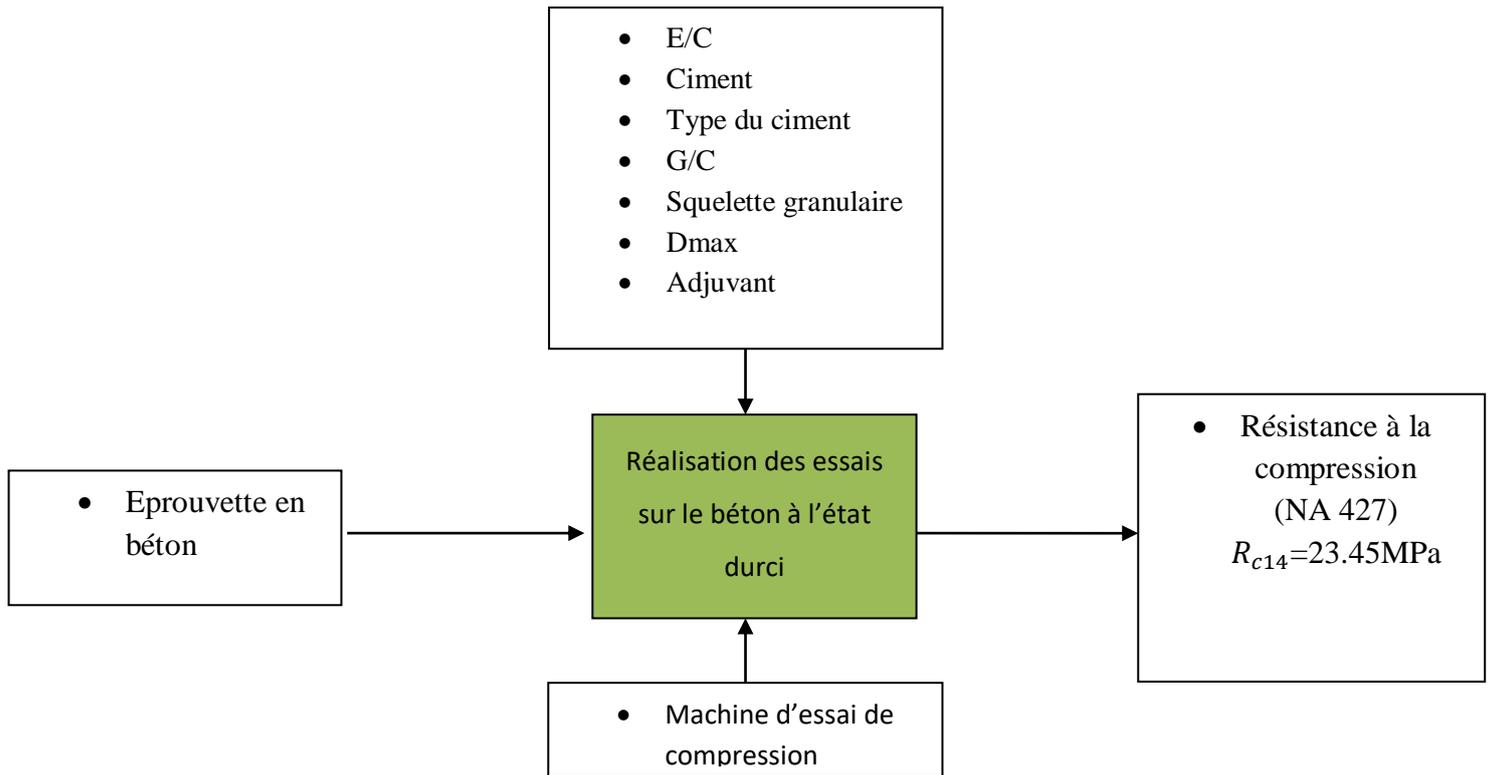


Figure 4.17 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la huitième formulation à l'état durci à 14 jours

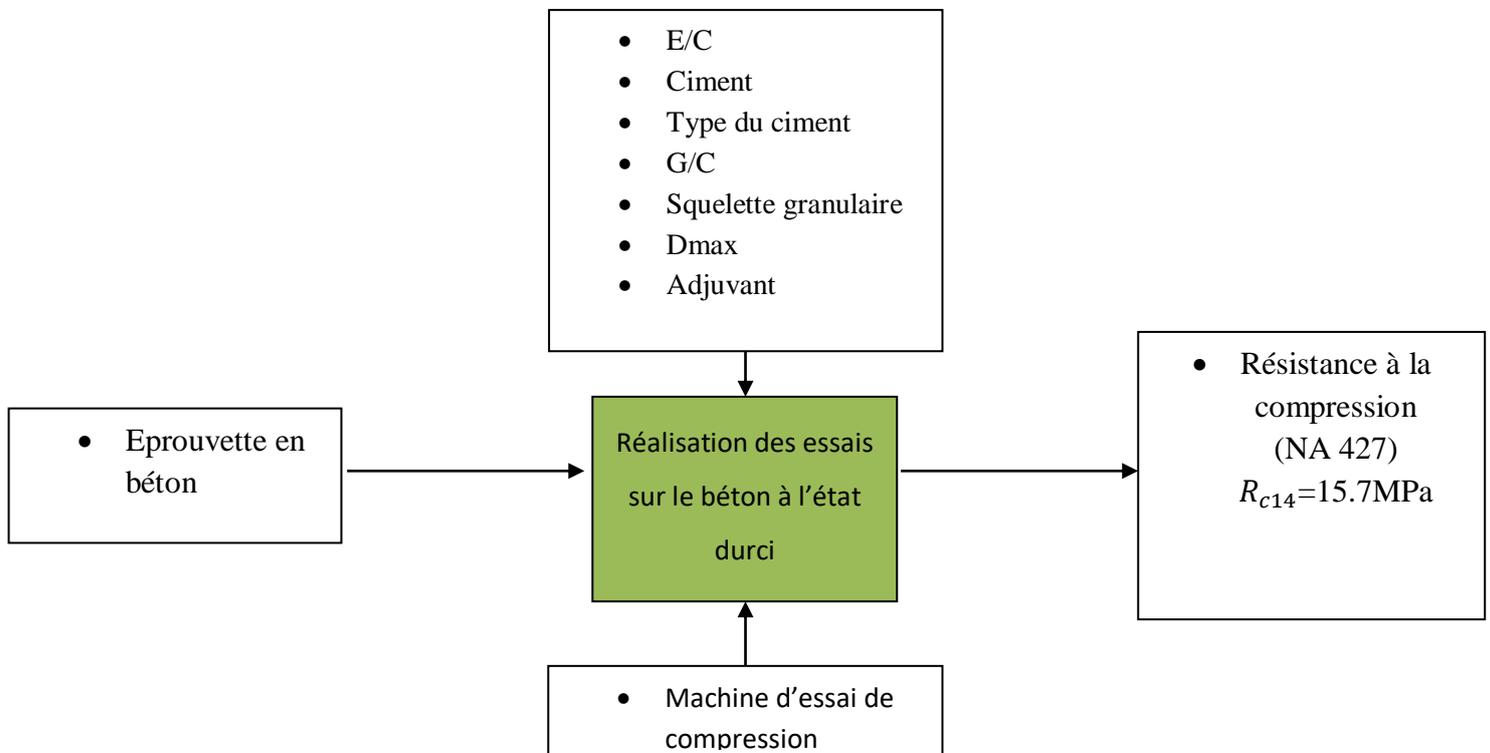


Figure 4.18 : processus d'essai de compression réalisé sur le béton de la neuvième formulation à l'état durci à 14 jours.

4.5 Processus d'application des essais d'ultrason sur le béton à l'état durci à 14 jours:

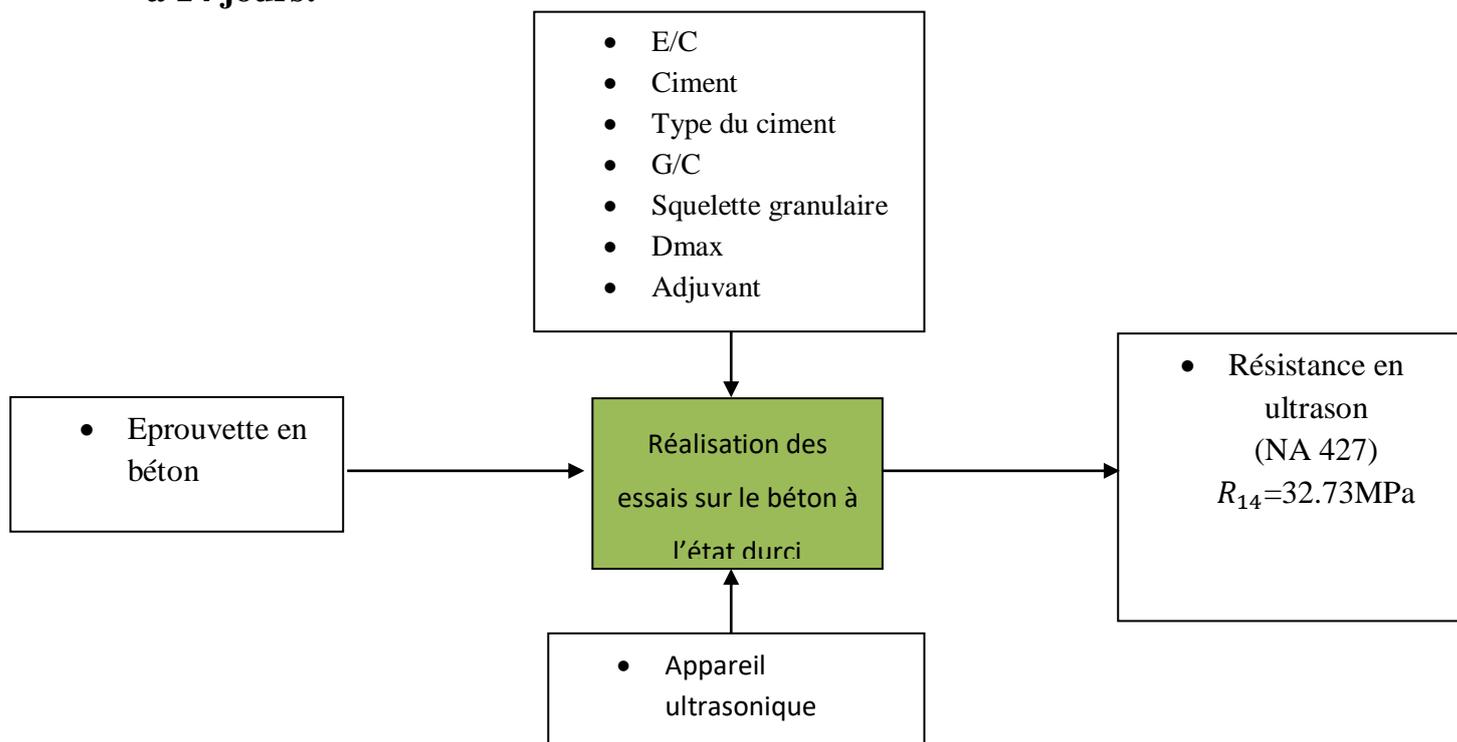


Figure 4.19 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la première formulation à l'état durci à 14 jours

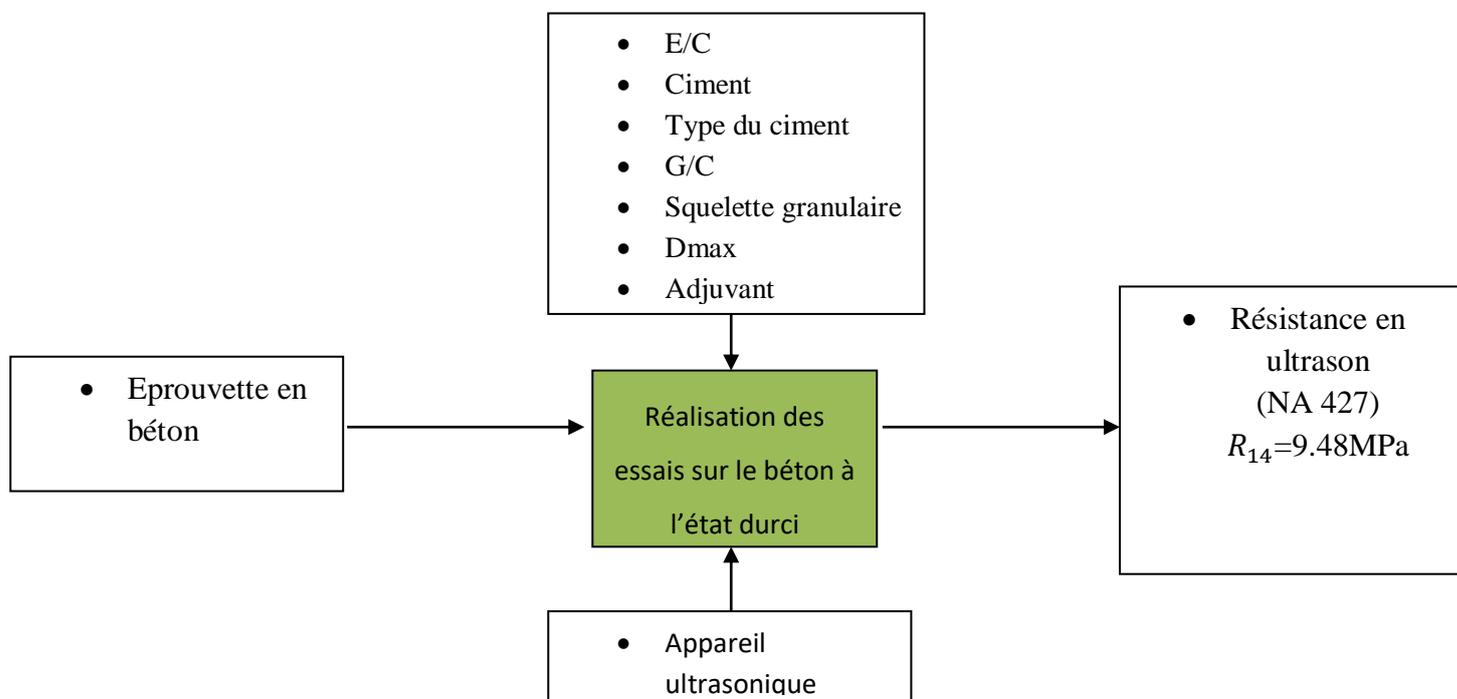


Figure 4.20 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la deuxième formulation à l'état durci à 14 jours

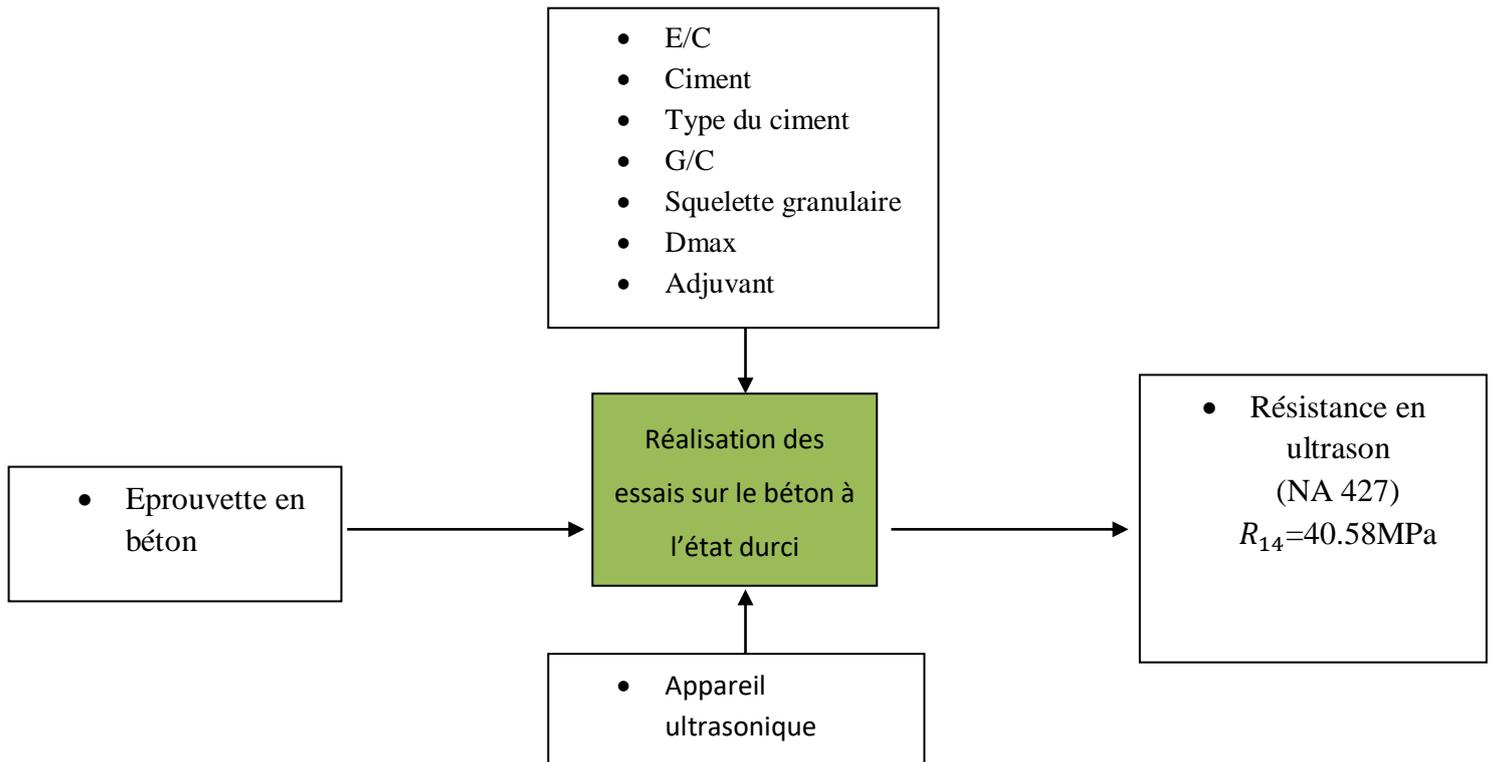


Figure 4.21: processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la troisième formulation à l'état durci à 14 jours

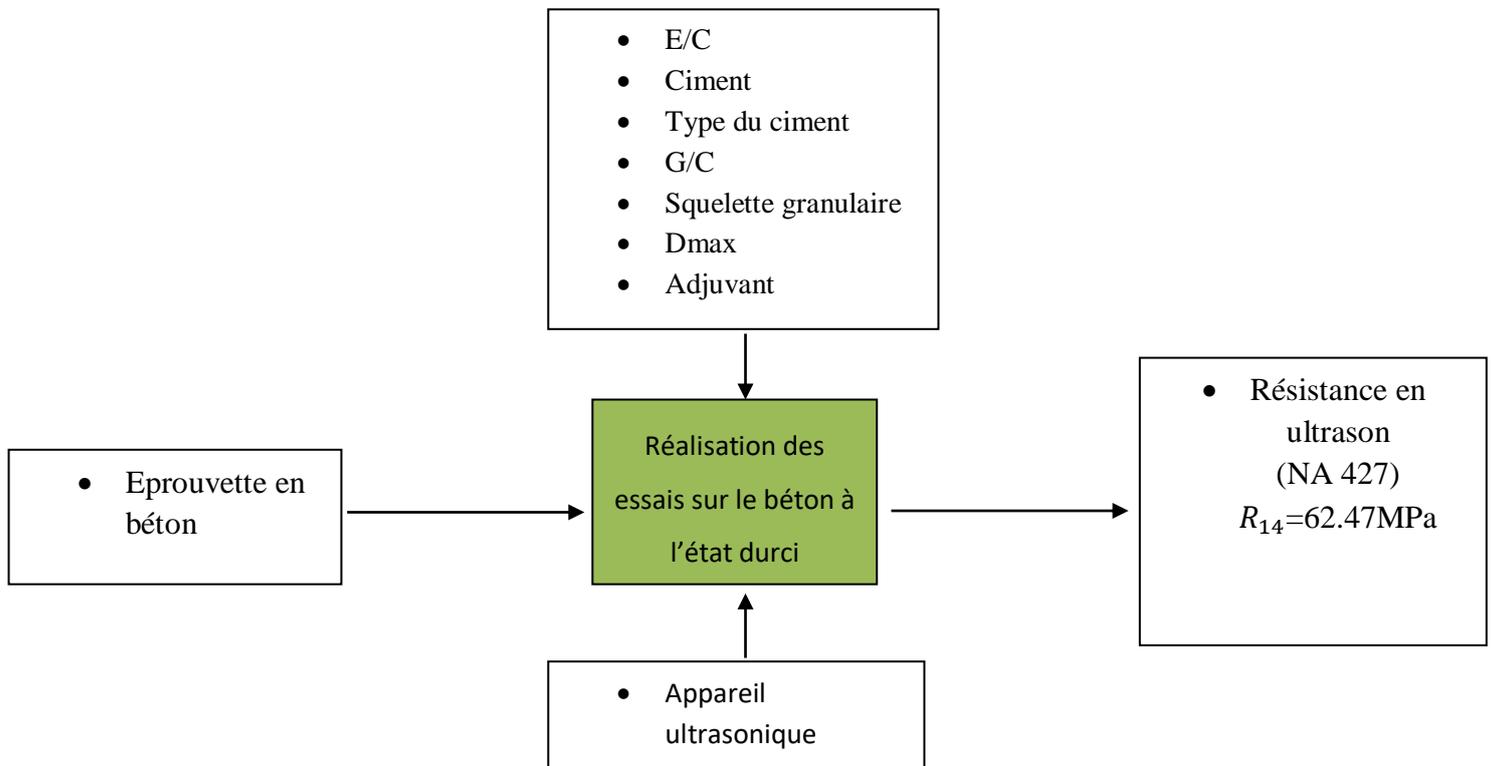


Figure 4.22 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la quatrième formulation à l'état durci à 14 jours

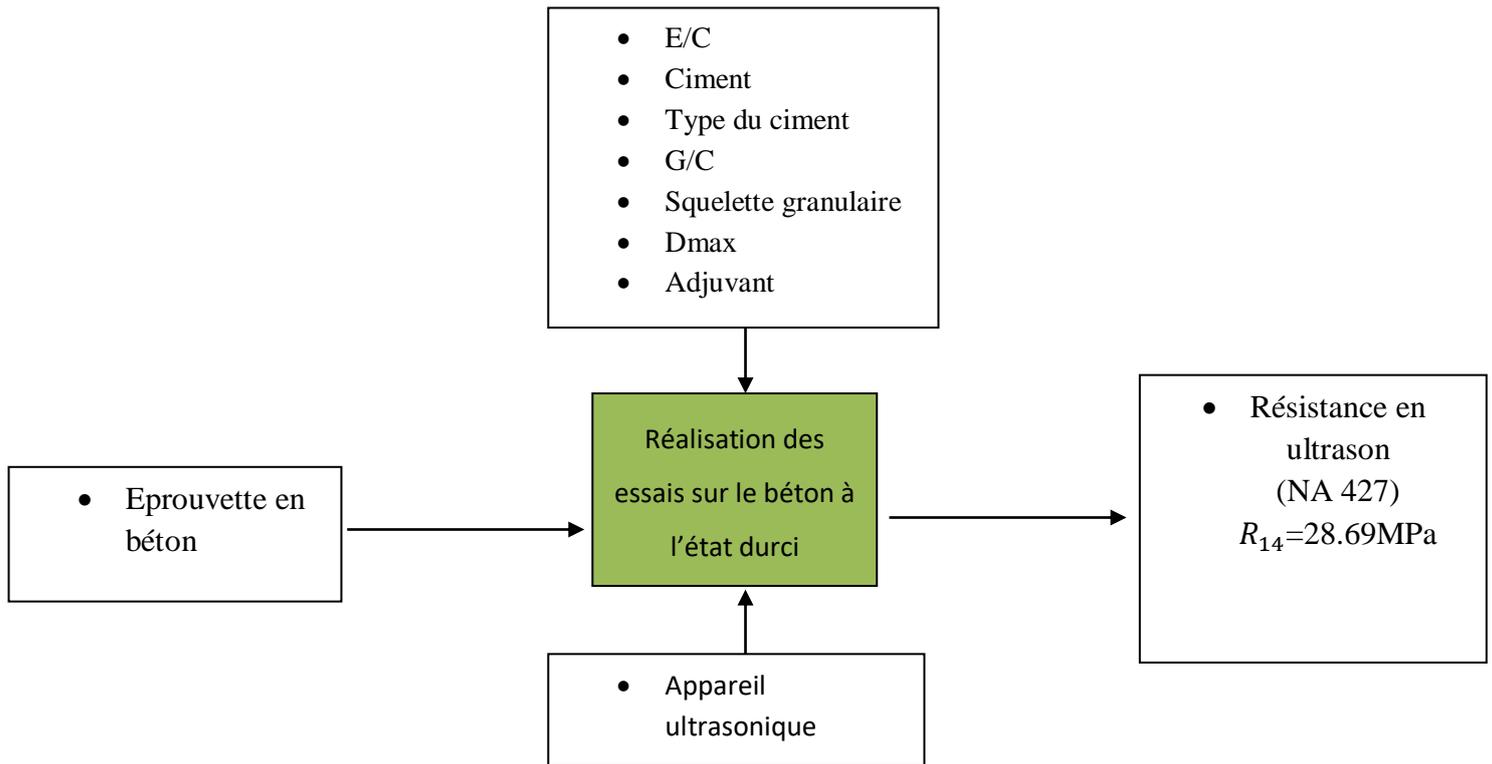


Figure 4.23 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la cinquième formulation à l'état durci à 14 jours

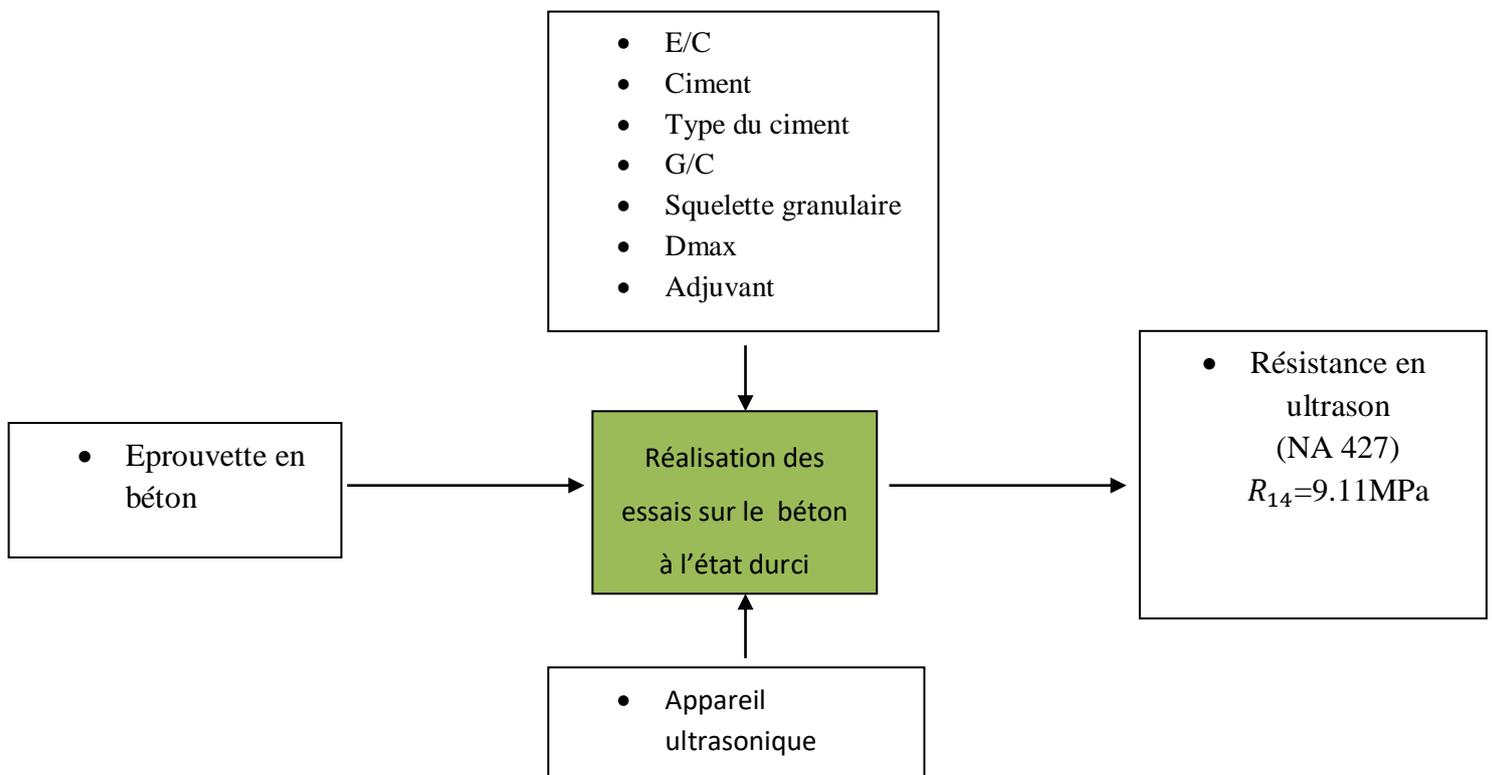


Figure 4.24 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la sixième formulation à l'état durci à 14 jours

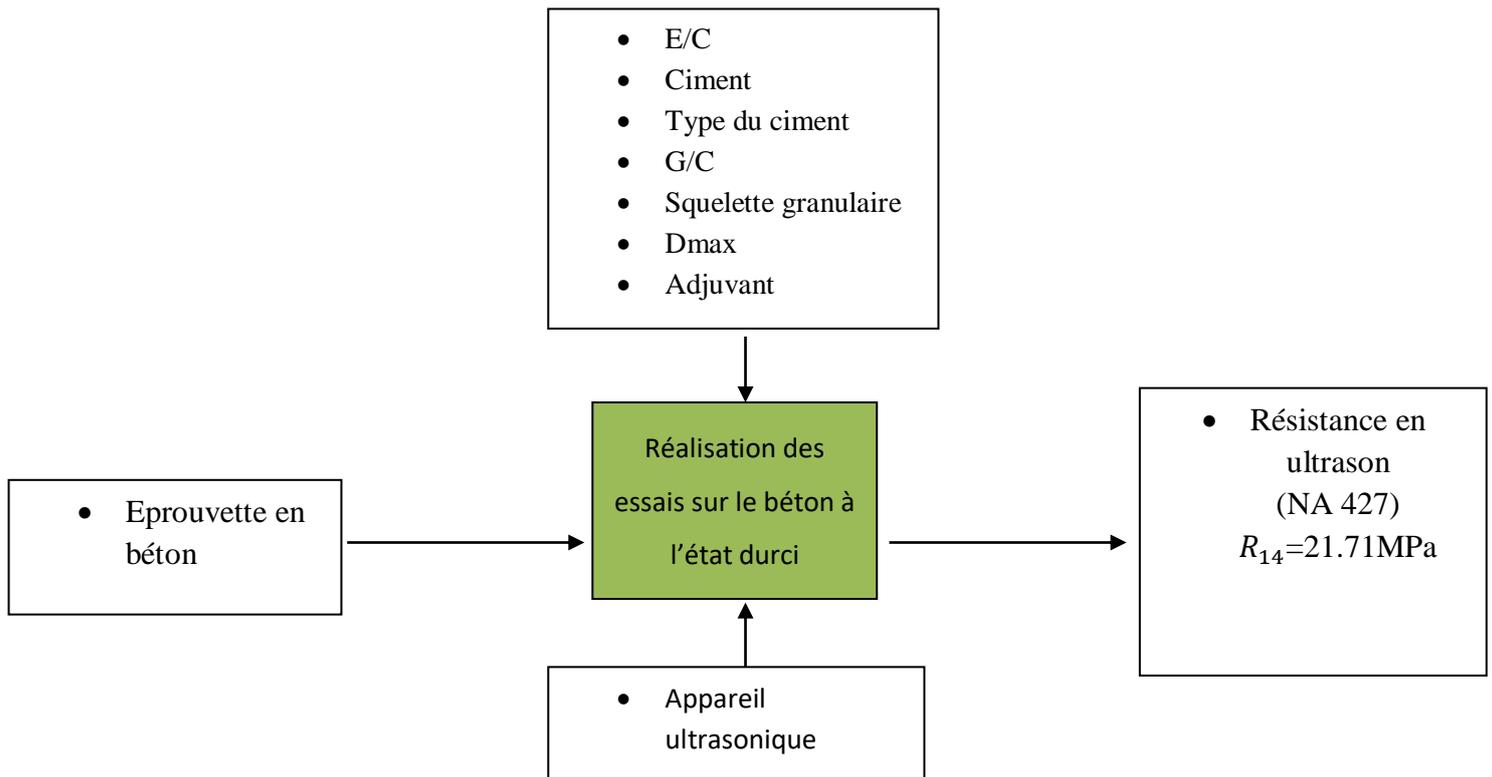


Figure 4.25 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la septième formulation à l'état durci à 14 jours

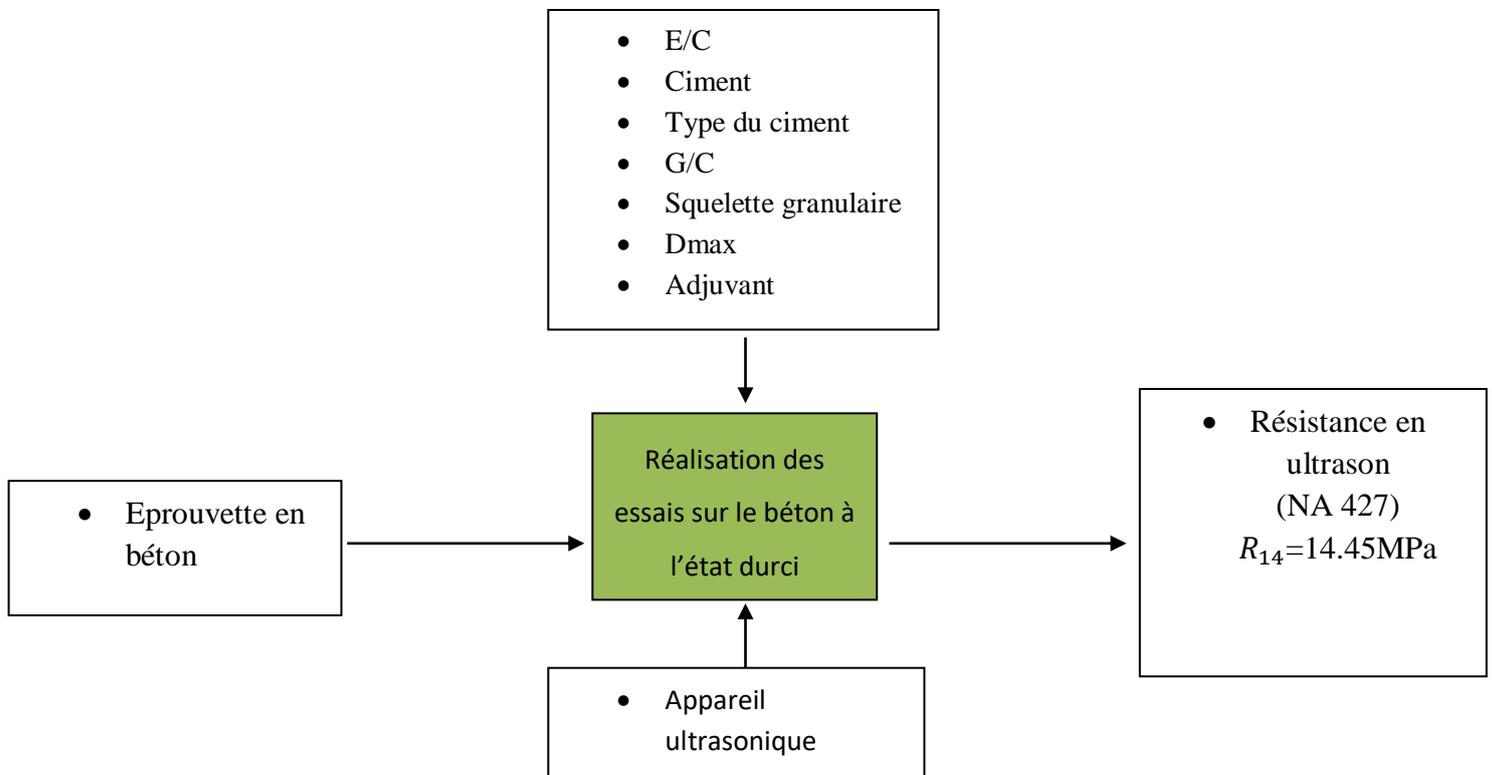


Figure 4.26 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la huitième formulation à l'état durci à 14 jours

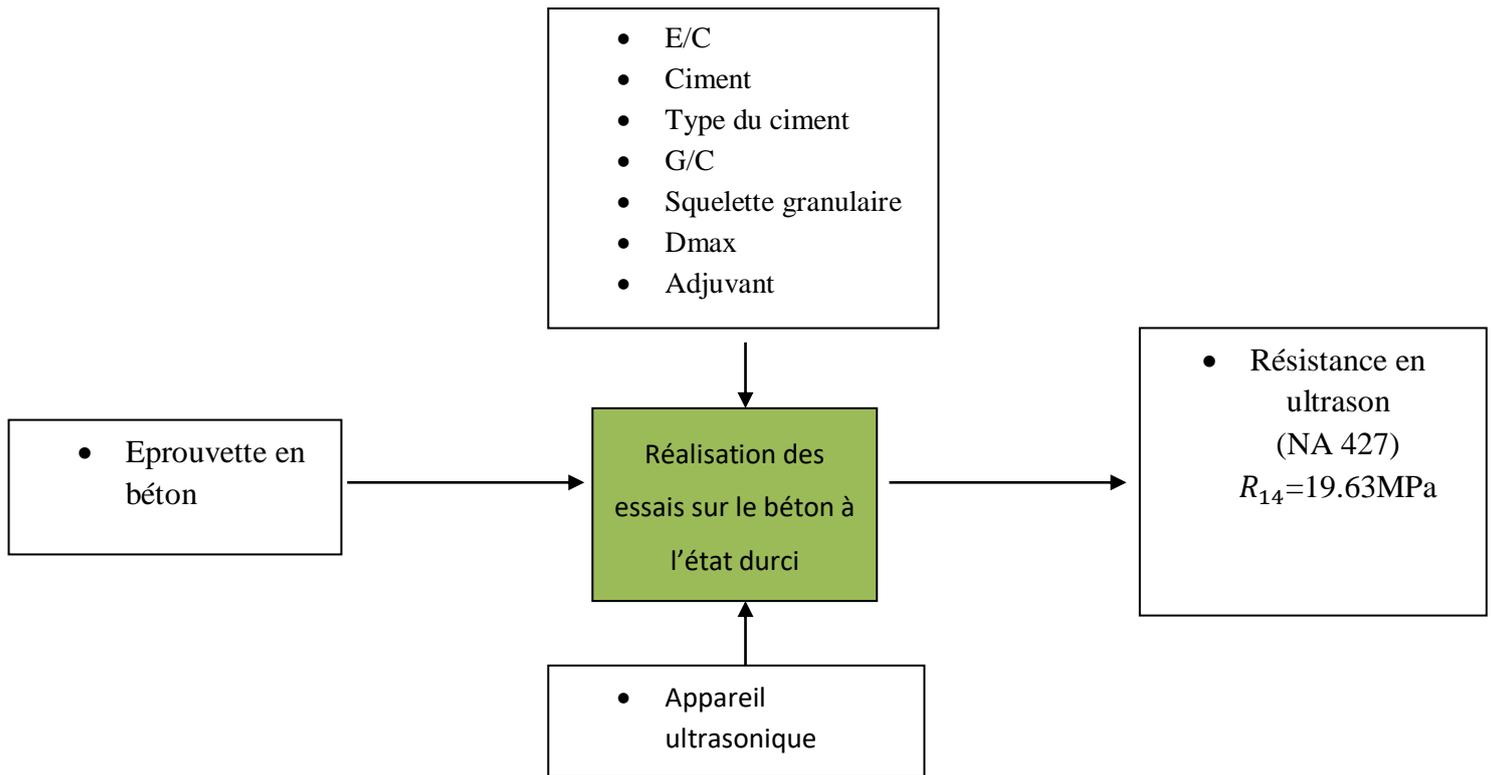


Figure 4.27 : processus d'essai d'ultrason réalisé sur le béton de la neuvième formulation à l'état durci à 14 jours

4.6 Conclusion :

Maîtriser un processus c'est :

- Résultat conforme du premier coup
- Temps de cycle du processus stable
- Prévention des risques de défaillance
- Ressources correctement allouées

Et pour cela ces processus sont conformes aux normes et qui amènent à la bonne qualité liée à la méthode Taguchi.

CHAPITRE 5

RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 Mise en application de la méthode Taguchi :

5.1.1 Facteurs :

Les facteurs ciblés par cette recherche sont les composants principaux qui ont une grande influence sur le comportement des bétons à l'état frais et à l'état durci. Ces paramètres sont : le ciment, le rapport eau/ciment (E/C) et le rapport granulat/sable (G/S), le tout par unité de volume du mélange à l'état frais.

5.1.2 Niveaux des facteurs :

La recherche bibliographique nous a permis de déterminer les fourchettes dont lesquelles varient généralement les paramètres de notre étude. les limites de ces fourchettes sont résumés dans le **tableau 5.1**.

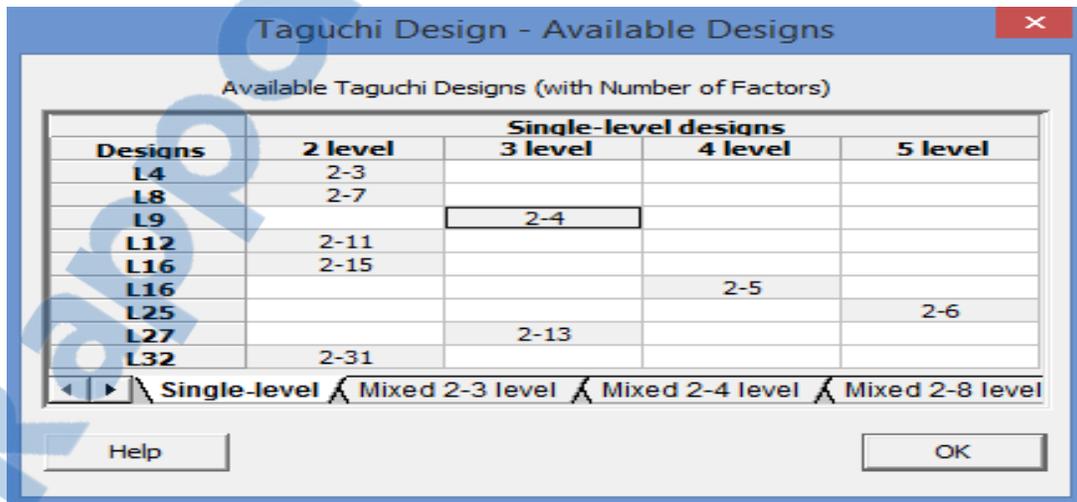
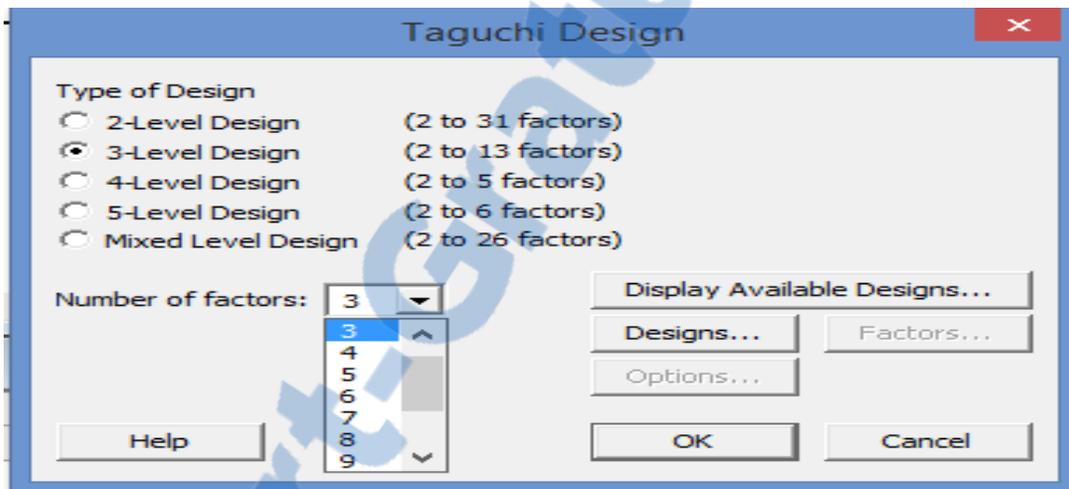
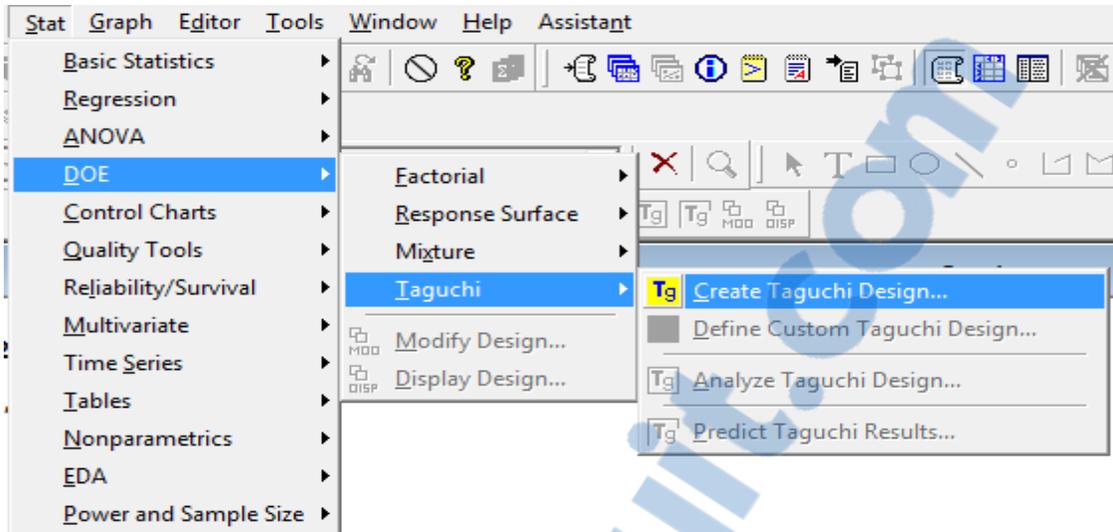
Tableau 5.1 : niveaux des facteurs

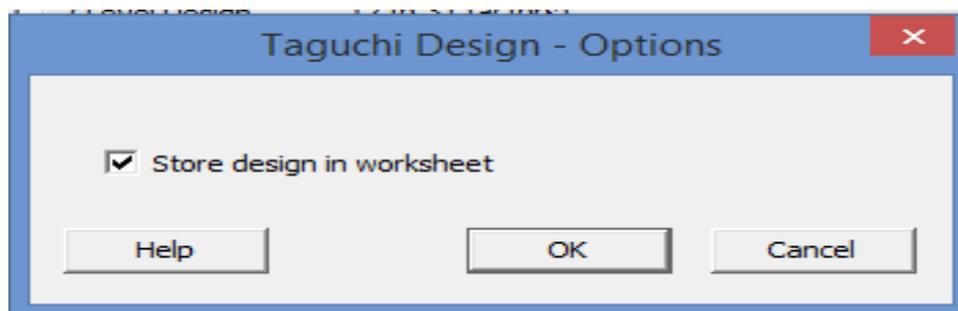
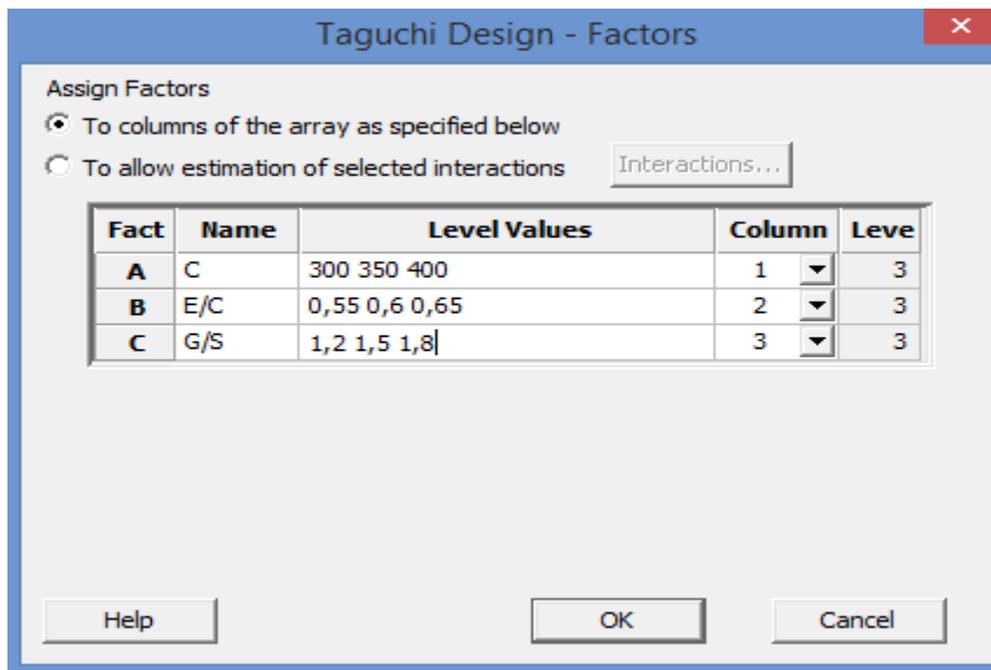
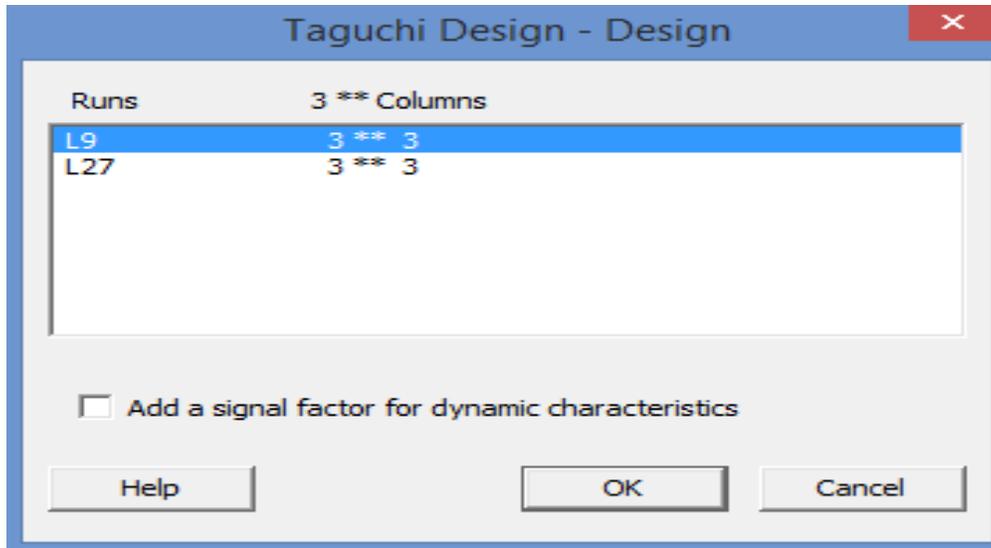
Facteurs	Niveaux		
C (kg/m ³)	300	350	400
E/C	0.55	0.6	0.65
G/S	1.2	1.5	1.8

5.1.3 Choix de la matrice de Taguchi pour notre étude :

Avec une matrice de trois facteurs à trois niveaux, nous aurons un nombre d'essai qui sera égal à $3^3= 9$. Cependant, vu que ce nombre est acceptable pour un travail de laboratoire, un plan matriciel complet sera appliqué pour avoir de meilleures précisions.

La matrice expérimentale est établie à l'aide du logiciel MINITAB, selon les étapes suivantes :





La matrice des effets selon la méthode Taguchi sera donc comme suit :

Tableau 5.2 : matrice des effets

N° Essai	C (kg/m ³)	E/C	G/S
1	300	0,55	1,2
2	300	0,6	1,5
3	300	0,65	1,8
4	350	0,55	1,5
5	350	0,6	1,8
6	350	0,65	1,2
7	400	0,55	1,8
8	400	0,6	1,2
9	400	0,65	1,5

5.2 Formulation des bétons étudiés :

Les teneurs des constituants des bétons formulés à partir du plan matriciel établi dans le domaine d'étude sont résumées dans le **tableau 5.3** :

Tableau 5.3 : formulation des bétons constitués

Formulation	Ciment (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Sable 0/4 (kg/m ³)	Gravier 4/8(kg/m ³)	Gravier 8/16(kg/m ³)	Gravier 16/25(kg/m ³)	Adjuvant (kg/m ³)
1	300	165	858	107	467	459	4
2	300	180	751	115	512	502	4
3	300	195	670	123	548	537	4
4	350	192.5	714	109	486	477	5
5	350	210	636	117	521	510	5
6	350	227.5	812	99	443	435	5
7	400	220	658	121	539	528	6
8	400	240	841	103	458	450	6
9	400	260	739	113	504	494	6

5.3 Affaissement :

L'affaissement dépend de plusieurs facteurs tels que : dosage en eau, ciment, la forme des granulats. C'est la caractéristique la plus importante pour un béton à l'état frais afin de justifier le moyen de serrage. Il est donc nécessaire de trouver le modèle pour prédire cette caractéristique.

Pour l'ensemble des formulations, l'affaissement sera mesuré à l'aide du cône d'Abrams.

Les résultats obtenus sont consignés dans le **tableau 5.4**.

Tableau 5.4 : résultats des essais d'affaissement

N° formulation	Affaissement (cm)
1	3.5
2	13
3	14
4	21
5	16
6	21
7	21
8	23
9	16.5

5.3.1 Détermination des coefficients du modèle :

Les coefficients du modèle sont obtenus à l'aide d'une régression multiple.

$$\text{Affaissement} = - 33,4 + 0,100 C + 20,0 E/C + 1,94 G/S$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-33,36	31,10	-1,07	0,332
C	0,10000	0,04206	2,38	0,063
E/C	20,00	42,06	0,48	0,654
G/S	1,944	7,010	0,28	0,793

$$S = 5,15132 \quad R\text{-Sq} = 54,4\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 27,0\%$$

5.3.2 Interprétation :

Le signe plus (+) indique que les facteurs influent positivement sur l'affaissement.

Il est clair que l'augmentation du dosage en ciment réduit le frottement entre les granulats et conduit donc à une amélioration de l'ouvrabilité.

Par ailleurs la croissance du rapport E/C implique plus d'eau dans le mélange ce qui se traduit par une augmentation de l'affaissement.

En plus, un rapport élevé de G/S qui se traduit par une grande quantité de granulat et d'une petite quantité de sable amène à améliorer l'ouvrabilité du mélange.

En effet, en augmentant le rapport G/S, amène à réduire la demande en eau qui est plus important pour les grains du sable à cause des fines présentes dans ce granulat. De ce fait une plus grande quantité d'eau reste libre dans le mélange et participe à améliorer la fluidité du mélange.

Toutefois il est toujours recommandé d'optimiser le rapport G/S pour avoir les meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques du mélange.

Les courbes iso-réponses obtenues et qui peuvent prédire l'affaissement à partir des paramètres étudiés sont illustrées par les figures 5.1, 5.2 et 5.3.

Ces figures montrent clairement que l'affaissement peut dépasser 20 cm si le dosage en ciment varie entre 350 et 400 kg/m³ avec un rapport E/C entre 0.55 et 0.625 et un rapport G/S variant entre 1.45 et 1.8.

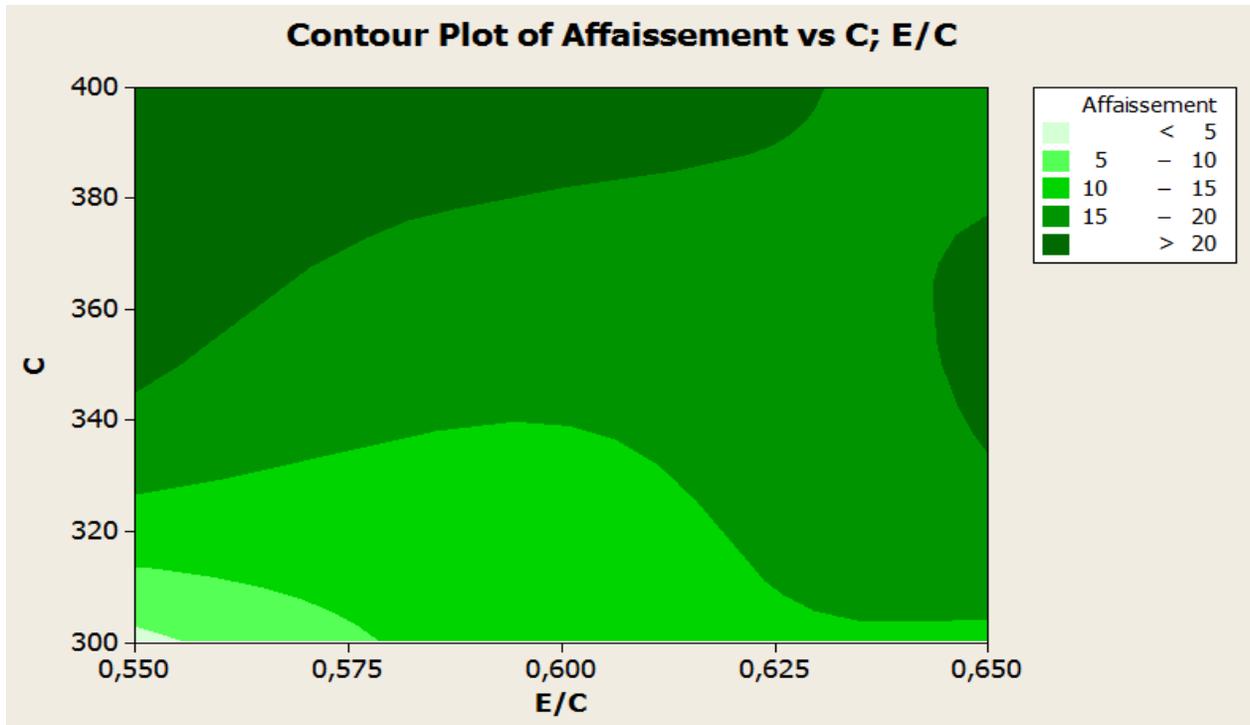


Figure 5.1 : Réponse de l'affaissement en fonction du ciment et du rapport E/C

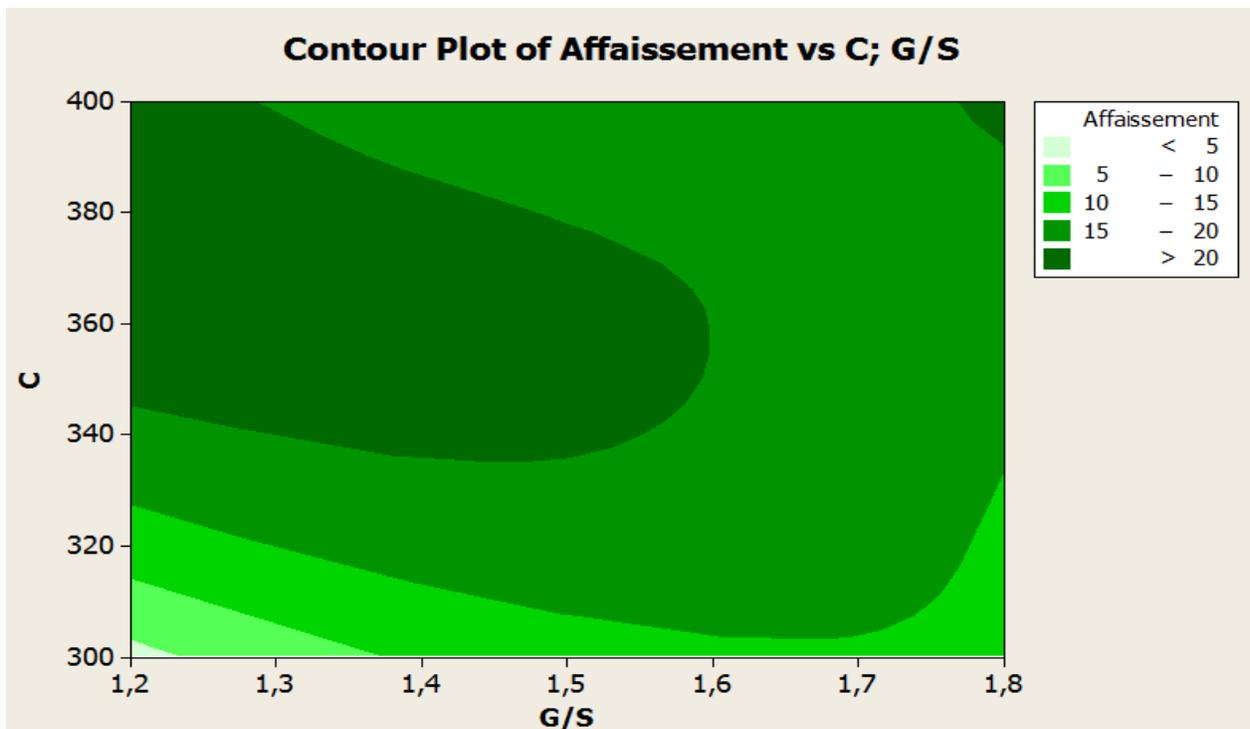


Figure 5.2 : Réponse de l'affaissement en fonction du ciment et du rapport G/S

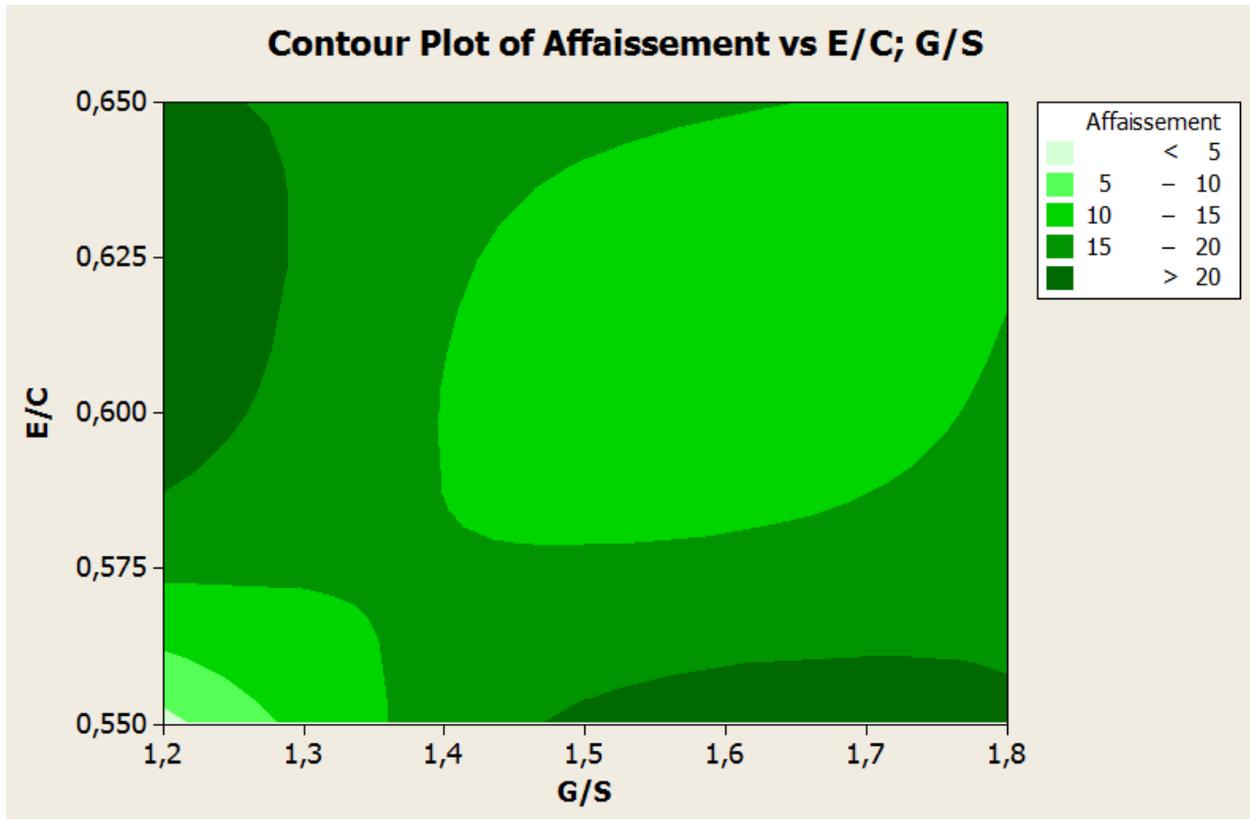


Figure 5.3 : Réponse de l'affaissement en fonction du rapport E/C et G/S

5.4 Résistance mécanique en compression :

La résistance dépend aussi de plusieurs facteurs tels que : le dosage en eau, le ciment, etc ... C'est la caractéristique la plus importante pour la formulation d'un béton. Nous avons donc réalisé la mesure de la résistance sur deux éprouvettes (11x22 cm²) pour chaque béton confectionné à l'aide d'une Machine de compression. Nous avons calculé la moyenne de la résistance pour chaque formulation à partir des valeurs trouvés. Ces moyennes sont mentionnées dans le **tableau (5.5)**.

Tableau 5.5 : Résultats des essais de résistance

N° formulations	Résistance 1	Résistance 2	Moyenne de la résistance (MPa)
1	28	29.7	28.85
2	19.6	23	21.3
3	14.6	16.2	15.4
4	11.3	8.1	9.7
5	22.1	24.5	23.3
6	18.9	20.7	19.8
7	24.9	26.6	25.75
8	21.9	25	23.45
9	16.4	15	15.7

5.4.1 Détermination des coefficients du modèle :

Les coefficients du modèle sont obtenus à l'aide d'une régression multiple en utilisant le logiciel d'analyse statistique MINITAB 16.

Compression 14 j = 54.3 + 0,0022 C – 44,7 E/C – 4,25 G/S.

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	54,29	41,89	1,30	0,252
C	-0,00217	0,05665	-0,04	0,971
E/C	-44,67	56,65	-0,79	0,466
G/S	-4,250	9,442	-0,45	0,671

S = 6,93863 R-Sq = 14,2% R-Sq(adj) = 0,0%

5.4.2 Interprétation :

Le signe plus (-) indique que les facteurs influent négativement sur la résistance.

Il est clair que le dosage en ciment a une très grande influence sur la résistance en compression.

Par ailleurs la diminution du rapport E/C implique moins d'eau dans le mélange ce qui se traduit par une augmentation de la résistance à la compression.

De plus, réduire le rapport G/S se traduit par l'augmentation du dosage en sable et des fines, qui jouent un rôle significatif sur la compacité et améliore la résistance mécanique. Toutefois l'effet du rapport G/S doit faire l'objet d'une étude plus approfondie en utilisant, à titre d'exemple, le modèle d'empilement compressible.

Les courbes iso-réponses obtenues et qui peuvent prédire la résistance mécanique à 14 j à partir des paramètres étudiés sont illustrées par les figures 5.4, 5.5 et 5.6.

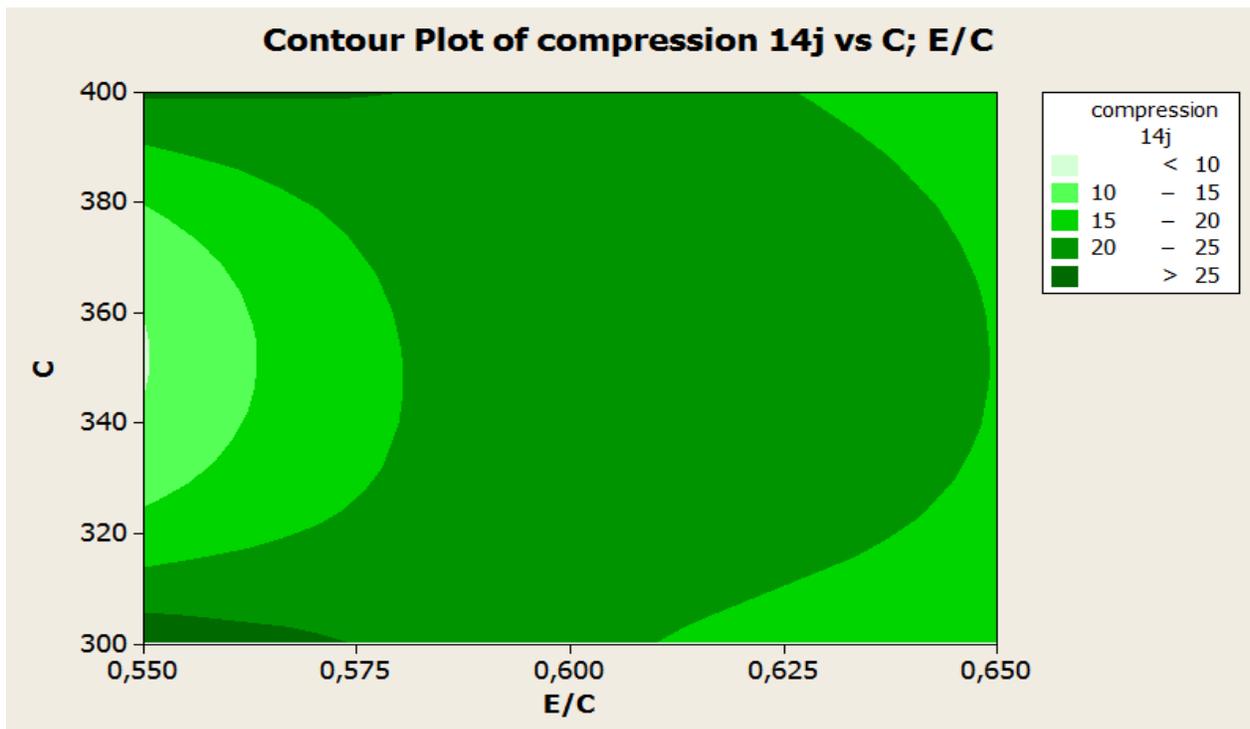


Figure 5.4 : Réponse de la résistance en compression en fonction du ciment et du rapport E/C

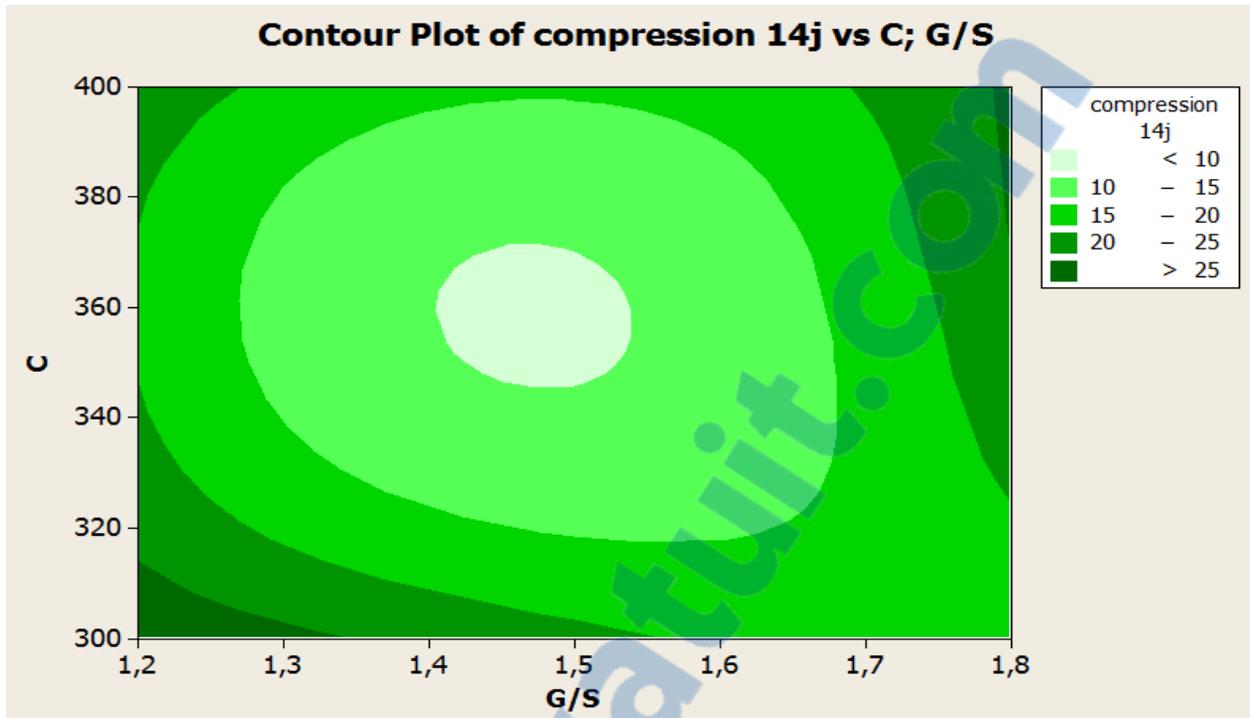


Figure 5.5 : Réponse de la résistance en compression en fonction du ciment et du rapport G/S

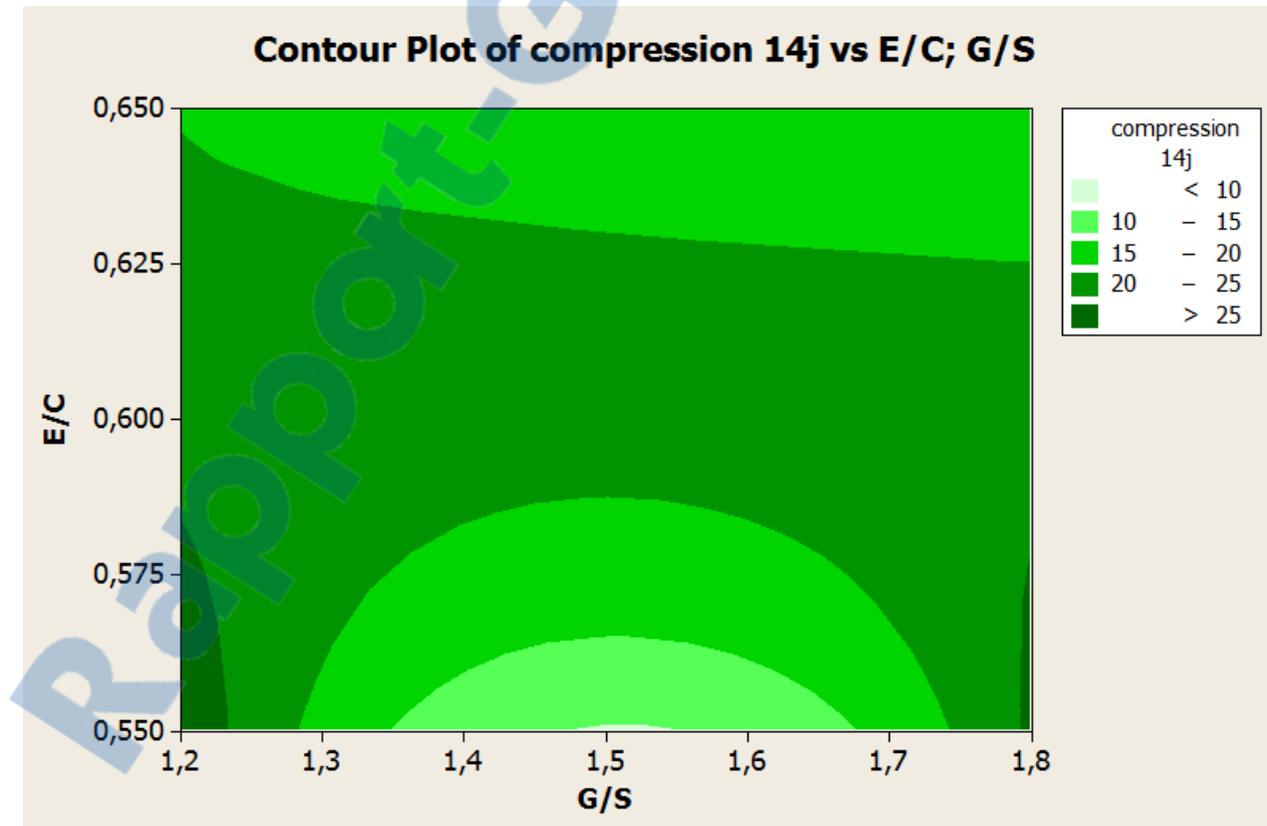


Figure 5.6 : Réponse de la résistance en compression en fonction du rapport E/C et G/S

Les résultats montrés par les figures 5.1, 5.2 et 5.3 montrent que la résistance en compression sera supérieure à 25 dans le cas où le dosage en ciment varie entre 380 et 400 kg/m³ avec un rapport G/S entre 1.75 et 1.8 et un rapport E/C entre 0.55 et 0.575.

5.5 Ultrason :

La résistance déduite par l'ultrason dépende du temps de passage d'onde dans l'échantillon. Nous avons donc réalisé des mesures sur trois éprouvettes (11x22 cm²) pour chaque béton confectionné. Nous avons calculé la résistance à partir du temps trouvé passant par la vitesse en utilisant la formule suivante :

$$R=0.342 \exp (1.004 V) \dots\dots\dots(5.1)$$

Avec :

R : résistance en ultrason (MPa)

V : vitesse ultrasonique (m/s)

Les résultats obtenus sont mentionnées dans le **tableau 5.6**.

Tableau 5.6 : Résultats des essais d’ultrason

N° formulation	Résistance 1	Résistance 2	Résistance 3	Moyenne de la résistance (MPa)
1	33.12	31	34.07	32.73
2	9.15	10.27	9.02	9.48
3	9.42	57.48	54.83	40.58
4	63.43	51.21	72.78	62.47
5	28.35	28.35	29.36	28.69
6	8.85	9.62	8.85	9.11
7	29.36	26.91	8.85	21.71
8	15.02	20.13	8.20	14.45
9	8.20	25.34	25.34	19.63

5.5.1 Détermination des coefficients du modèle :

Le modèle prédictif et les coefficients du modèle sont obtenus par une régression multiple.

$$\text{Résistance/Ultrason } 14 \text{ j} = 124 - 0,090 \text{ C} - 159 \text{ E/C} + 19,3 \text{ G/S}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	124,3	109,5	1,14	0,308
C	-0,0900	0,1480	-0,61	0,570
E/C	-158,6	148,0	-1,07	0,333
G/S	19,27	24,67	0,78	0,470

S = 18,1306 R-Sq = 29,9% R-Sq(adj) = 0,0%

5.5.2 Interprétation :

A partir du modèle, nous constatons que le coefficient associé au rapport E/C est très élevé, ce qui montre l’influence significative du rapport E/C sur les résultats de l’ultrason. En effet, un dosage en eau élevé a comme conséquence d’augmenter la porosité du mélange ce qui réduit les résistances mécaniques.

Les courbes iso-réponses obtenues pour cette réponse sont illustrées par les figures 5.7, 5.8 et 5.9.

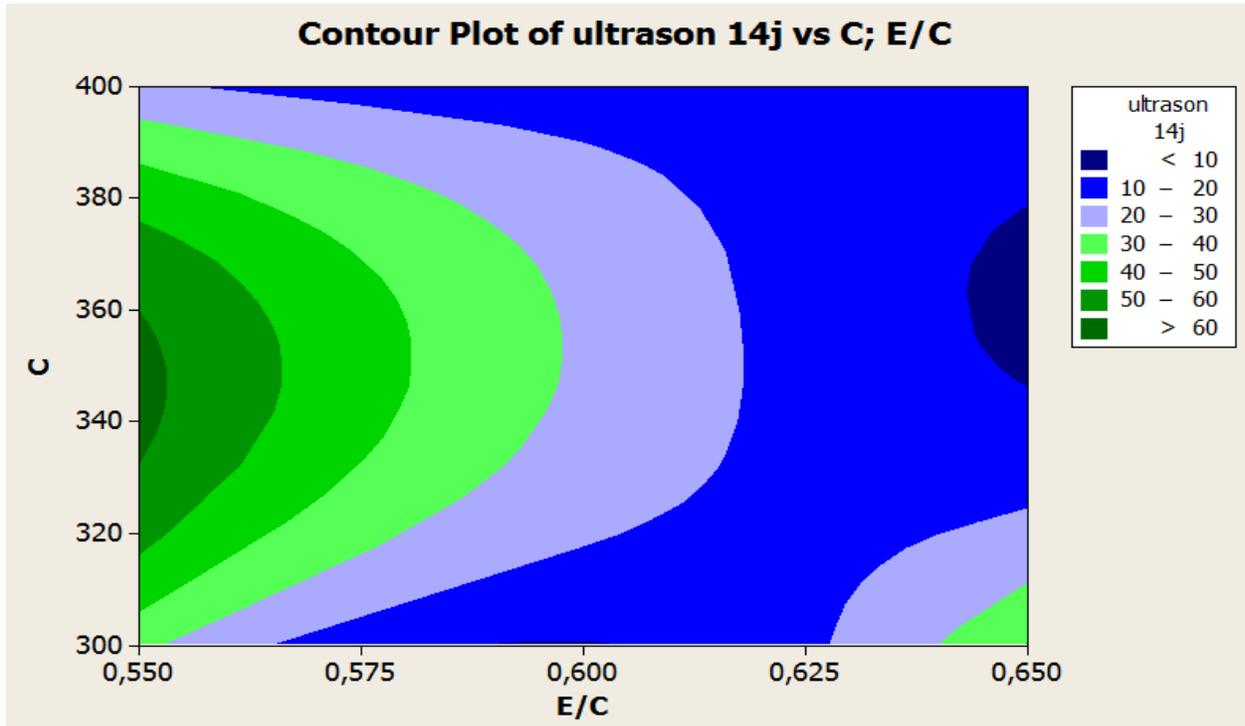


Figure 5.7 : Réponse de la résistance en ultrason en fonction du ciment et du rapport E/C

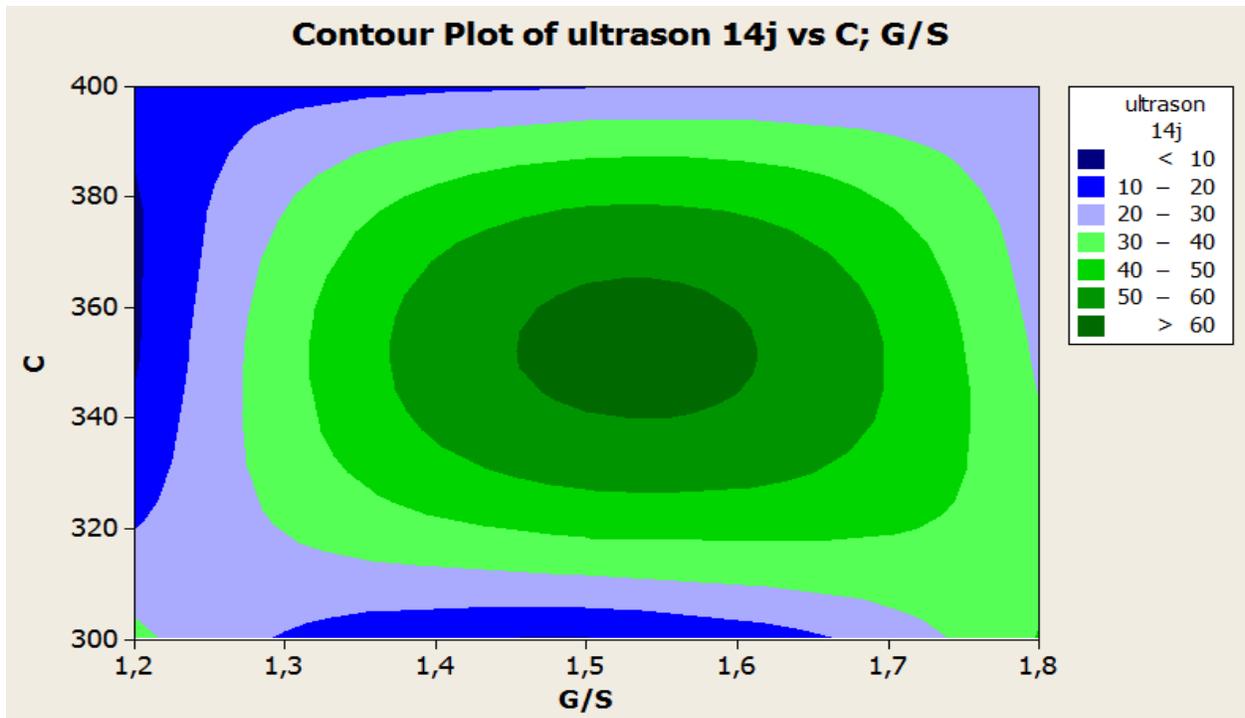


Figure 5.8 : Réponse de la résistance en ultrason en fonction du ciment et du rapport G/S

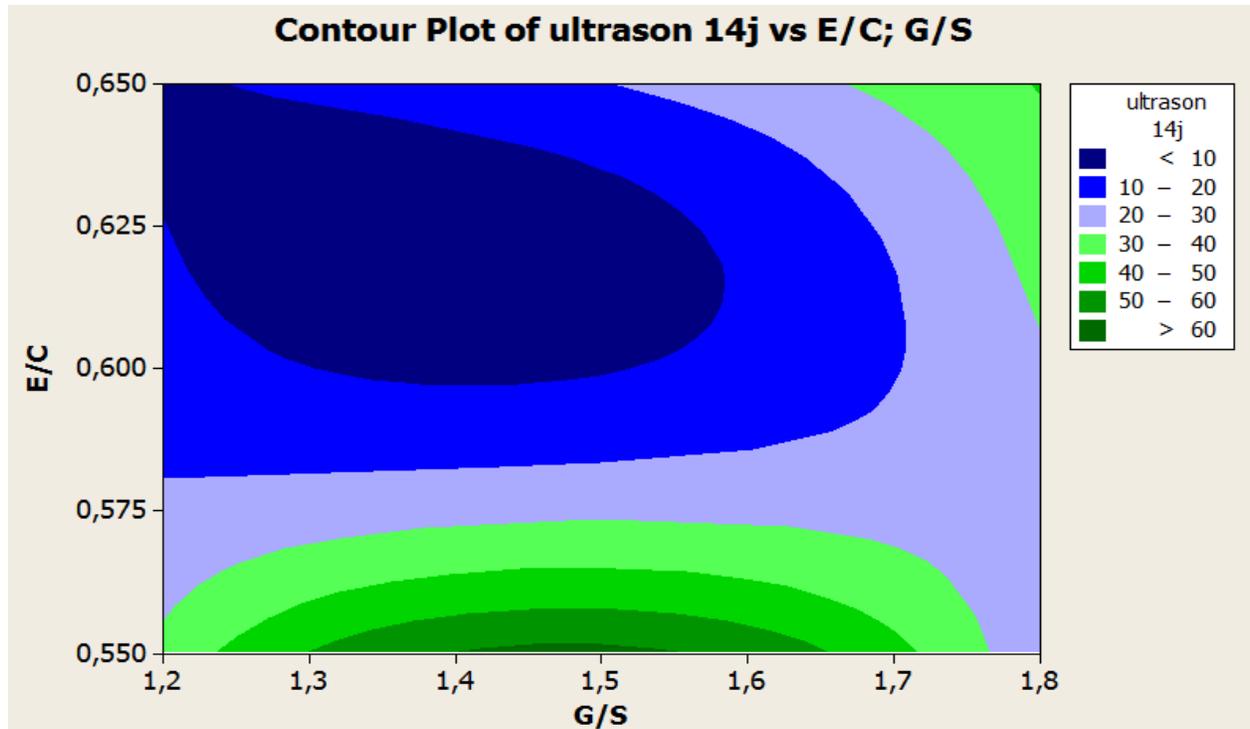


Figure 5.9 : Réponse de la résistance en ultrason en fonction du rapport E/C et G/S.

Les résultats montrés par les figures 5.1, 5.2 et 5.3 montrent que obtenir les plus grandes valeurs des résistances, il faut que :

- le dosage en ciment est entre 330 et 400 kg/m³ et si le rapport E/C qui ne dépasse pas 0.56 et un rapport G/S qui varie entre 1,45 et 1,6

5.6 Conclusion :

Les modèles dérivés et basés sur une approche de conception factorielle se sont révélés intéressantes pour comprendre les interactions entre les différents paramètres du mélange.

Ces modèles statistiques fournissent un moyen efficace pour évaluer l'influence et les effets des variables du mélange. Ils sont valables pour un large éventail de mélanges dans les fourchettes étudiés.

Ces figures montrent clairement que l'affaissement peut dépasser 20 cm si le dosage en ciment varie entre 350 et 400 kg/m³ avec un rapport E/C entre 0.55 et 0.625 et un rapport G/S variant entre 1.45 et 1.8.

Les résultats ont aussi montré que l'ouvrabilité ne peut être amélioré qu'en augmentant le dosage en liant ou le rapport E/C et en considérant un rapport G/S entre 1.45 et 1.8. Cependant, il est nécessaire de faire attention aux résistances mécaniques si nous choisissons d'augmenter le rapport E/C.

Les résultats trouvés ont clairement fait sortir que la résistance mécanique augmente avec le dosage en ciment. Par ailleurs, le dosage en eau ne doit pas dépasser 0.56 et le rapport G/S doit être compris entre 1,45 et 1,6.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette recherche a pour but la maîtrise de la régularité de la qualité du béton. Ce travail a été réalisé par l'utilisation de la méthode Taguchi qui nous a permis d'obtenir trois modèles, un modèle de résistance à la compression, d'affaissement et de résistance en ultrason, leurs utilisations s'avèrent très utile en pratique et nous permettent d'apprécier la composition d'un béton conforme aux normes.

Les mesures obtenues lors des essais réalisés nous ont permis la détermination des modèles prédictifs de l'affaissement, la résistance à la compression et de résistance en ultrason.

Avec les modèles :

$$RC14 \text{ (MPa)} = -33.4 + 0.1C + 20E/C + 1.94 \text{ G/S}$$

$$\text{Aff (cm)} = 54.3 - 0.0022 - 44.7 E/C - 4.25 \text{ G/S}$$

$$RU14 \text{ (MPa)} = 124 - 0.09 C - 159 E/C + 19.3 \text{ G/S}$$

Et pour la partie qualité on a construit les processus qualité pour la réalisation du béton, et on a choisi l'approche processus car elle constitue un principe fondamental de la démarche qualité.

Des corrélations entre les diverses réponses expérimentales ont été établies afin de minimiser le nombre d'essais caractérisant ce béton dans le futur.

Les modèles développés peuvent être employés pour sélectionner les mélanges les plus économiques, tout en évitant de réaliser un grand nombre d'essais pour un mélange optimal et qui répond aux cahiers de charges. Ces modèles peuvent être développés et améliorés en prenant en considération d'autres paramètres intrinsèques importants comme la granulométrie ou la forme des granulats. D'autres paramètres extrinsèques au béton peuvent aussi être étudiés comme l'influence de la température. Enfin, les modèles trouvés peuvent être mis sous forme de programmes informatiques afin de faciliter leur exploitation par les utilisateurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADAM M. NEVILLE (1992) ; Propriétés des bétons, Ed. Eyrolles, , p. 805.

AFNOR. (2002) ; Normalisation française.

ALEXANDER K.M. et col. (1961), Discussion of Walker S. and Bloem D.L. (1960), “Effect of Aggregate Size on Properties of Concrete”, ACI Journal, Vol. 32, N° 9, pp. 1201-1258.

ANDRIAMANANSTILAVO.N (2003) : «Comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation ». Thèse de doctorat à l’Université de BOUMERDES.

AYAD M. , BARKA Y. (2013) ; modélisation des bétons ordinaires par les plans d’expériences p.130

BARON J., OLLIVIER J.P. (1996) ; Les bétons bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, Paris, 522 p.

BÉTON – DÉFINITION (2008) ; Encyclopédie scientifique en ligne : [www, techno-science, net](http://www.techno-science.net), 2008.

BOUKHELKHAL D, KENAI S., (2015) ; détermination non destructif de la résistance du béton sur site (scléromètre & ultrason), 9 p.

BOUKLI HACENE S. M. A., (2010) : « Contribution à l’étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de TLEMCCEN » Thèse de Doctorat à l’Université de Tlemcen, Janvier, 193p.

CAZACLIU B., GUIEYSSE B., GARCIN O., BUISSON F., BAUDRU Y., CHANUT S., LALLEMANT-GAMBOA I. (2006) ; Laboratory evaluation of 9 mixers, rapport LCPC pour le projet européen Innocrete, 71 p.

CHANVILLARD G. (1999) ; Connaissances générales sur le matériau béton, Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Lyon, 169 p.

CIMBÉTON (2006); Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre, Paris.

DE LARRARD F., BELLOC A. (1999) ; L’influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N°219, Janvier Février, pp.41-52.

DE LARRARD F., SITZKAR J.C., HU C. (1993) ; Conception d'un rhéomètre pour bétons fluides. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 186, Juillet-Août, pp. 55-60.

DE LARRARD. (2000) ; structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par LECOMTE A, études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 414 p.

DREUX G., FESTA J. (1998) ; Nouveau guide du béton et ses constituants, éditions Eyrolles ; Paris, 409 p.

DREUX. G. (1979) ; Nouveau guide du béton. Edition Eyrolles, Paris, 201p.

DUPAIN R., LANCHON R., SAINT-ARROMAN J.C. (2000) ; Granulats, sols, ciments et bétons, Edition Casteilla, Paris, 236 p.

DUPAIN R., LANCHON R., SAINT-ARROMAN J.C. (2000); Granulats, sols, ciments et bétons, Edition Casteilla, Paris, 236 p.

EI BARRAK M. (2005), « Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais », Thèse de doctorat à l'université Toulouse III –Paul Sabatier, Juillet. 229 p.

FAURY J. (1958) ; Le béton : Influence de ses constituants inertes. Règles à adopter pour sa meilleure composition, sa confection et son transport sur les chantiers, 3e édition, Dunod, Paris.

GABRYZIA. F(2007) ; Matériaux, Chapitre 4 bétons.

HU C. (1995) ; Rhéologie des bétons fluides, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA16, Paris.

KAWAKAMI H. (1972); Effect of gravel size on strength of concrete with particular reference to sand content, Proc. Int. Conf. On Mechanical Behaviour of Materials, Kyoto, vol. IV, Concrete and Cement Past Glass and Ceramics, pp. 96-103 (Society of Materials Science, Kyoto, Japan).

LAPOINTE R. (1997) ; Contribution à l'étude des méthodes d'injections des fissures dans le béton, Mémoire des études graduées, Université McGill, Montréal, Canada, mai.

NEVILLE M (2000) : Propriétés des bétons, traduction CRIB, p. 229-253, Editions Eyrolles.,

NGOC-DONG L. (2007) ; Amélioration de la régularité du béton en production, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 248 p.

NGUYEN T.L.H., (2007) ; Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons, Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, 139 p.

NORMES ALGERIENNES (1992) ; édition et diffusion Abou Hamou Moussa, Alger.

PILLET M. (1992) ; Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi, les éditions d'organisation Ed., Paris.

SADO G. et SADO M.C. (1991) ; Les plans d'expériences. De l'expérimentation à l'assurance qualité, Afnor Technique Ed., Paris.

STOCK A.F., HANNANT D.J., WILLIAMS R.I.T. (1979); The effect of aggregate concentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete, Mag. Concr. Res., 31, N° 109, pp. 225-34.

TALEB O., GHOMARI F., BOUKLI HACENE S.M.A., (2012) : Modélisation des bétons autoplaçants par les plans d'expérience, 1st International Conférence on Civil Engineering, 8 – 9 May 2012, Laghouat University, Algeria.

VENANT.M (1973) : Ciment et bétons, 2ème édition.